

UNIVERSITE CLAUDE-BERNARD - LYON I
U.E.R. DE MEDECINE
DE L'UNIVERSITE DE SAINT-ETIENNE
(Application de la convention du 10 Mai 1974)

Année 1977 - N° 216

**ETUDE BIOENERGETIQUE
D'UN SPORT COLLECTIF :
LE HAND-BALL.**

THESE

présentée

à l'Université Claude-Bernard - LYON
et soutenue publiquement le 27 Mai 1977
pour obtenir le grade de Docteur en Médecine

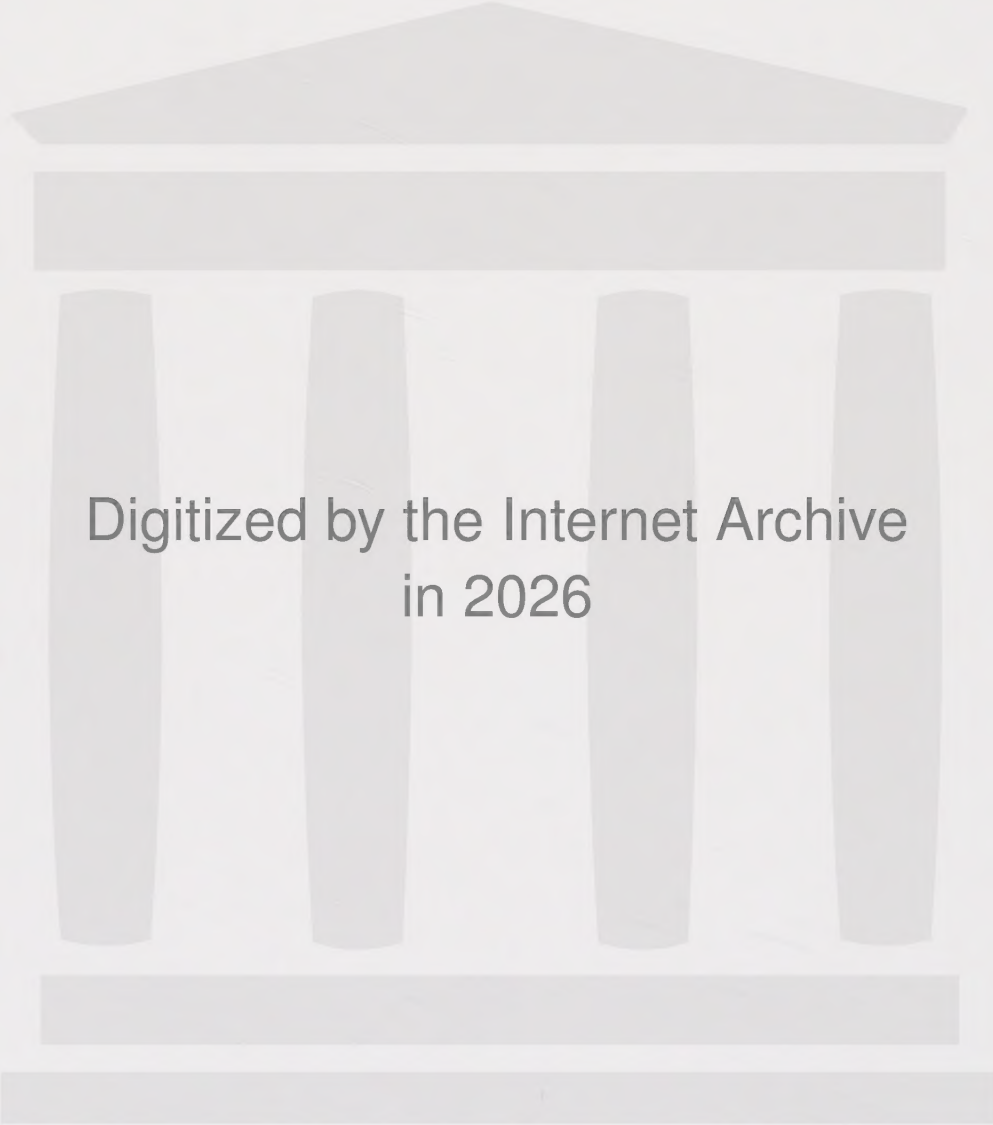
par

Christian DENIS

né le 15 Janvier 1951

à SAINT-GERMAIN-LAVAL (Loire)

29



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41554215_0020

UNIVERSITE CLAUDE-BERNARD - LYON I
U.E.R. DE MEDECINE
DE L'UNIVERSITE DE SAINT-ETIENNE
(Application de la convention du 10 Mai 1974)

Année 1977 - N° 216

**ETUDE BIOENERGETIQUE
D'UN SPORT COLLECTIF :
LE HAND-BALL.**



THESE

présentée

à l'Université Claude-Bernard - LYON
et soutenue publiquement le 27 Mai 1977
pour obtenir le grade de Docteur en Médecine

par

Christian DENIS

né le 15 Janvier 1951

à SAINT-GERMAIN-LAVAL (Loire)

UNIVERSITE CLAUDE BERNARD - LYON
FACULTE DE MEDECINE
DE L'UNIVERSITE DE SAINT-ETIENNE
Approuvé par le jury le 15 Mars 1903

Année 1902 - 1903

ETUDE HISTORIQUE
D'UN SPORT COLLECTIF :
LE HANO-BALL.



THÈSE

présentée

à l'Université Claude-Bernard - LYON

et soutenue publiquement le 27 Mars 1903

pour obtenir le grade de Docteur en Médecine

par

Christian DENIS

né le 15 Janvier 1873

à SAINT-ETIENNE (SAVAT 2016)

UNIVERSITE CLAUDE BERNARD - LYON

Président : M. le Professeur D. GERMAIN

Premier Vice-Président : M. le Professeur E. ELBAZ

Deuxième Vice-Président :

Troisième Vice-Président : M. H. BONNET, étudiant

Secrétaire Général de l'Université : M.J. RAMBAUD, Administrateur Civil

UNITES D'ENSEIGNEMENT ET DE RECHERCHE (U.E.R.)

U.E.R. médicale GRANGE-BLANCHE	: M.B. SALLE, M.C.A.
U.E.R. médicale ALEXIS-CARREL	: M. le Professeur C. GIROD
U.E.R. médicale LYON-NORD	: M. le Professeur J.P. GARIN
U.E.R. médicale SUD-OUEST	: M. le Professeur J.M. ROBERT
U.E.R. des Sciences Pharmaceutiques	: M. le Professeur ODDOUX
U.E.R. des Sciences Odontologiques	: M. le Professeur R. VINCENT
U.E.R. des Techniques de Réadaptation	: M.A. MORGON, Maître de Conférences
U.E.R. de Biologie Humaine	: M. le Professeur J.C. CZYBA
U.E.R. d'Education Physique et Sportive	: M.A. MILLON, Professeur d'E.P.S.
U.E.R. de Mathématiques	: M. le Professeur H. BUCHWALTER
U.E.R. de Physique	: M. le Professeur R. UZAN
U.E.R. de Chimie et Biochimie	: M. le Professeur J. HUET
U.E.R. des Sciences de la Nature	: M. le Professeur J. BRUN
U.E.R. de Sciences Physiologiques	: M. R. FONTANGES, Maître de Conférences
U.E.R. de Physique Nucléaire	: M. le Professeur M. GUSAKOW
U.E.R. de Mécanique	: M. le Professeur J. MATHIEU
Observatoire de LYON	:
I.U.T. 1	: M. le Professeur B. POUYET
I.U.T. 2	: M.J. GALLET, Directeur E.N.S.A.M.

- UNIVERSITE DE SAINT-ETIENNE -

Président : M. François THOMAS

Secrétaire Général : M. Raymond ROUQUAIROL

UNITES D'ENSEIGNEMENT ET DE RECHERCHE (U.E.R.)

U.E.R. de Droit	: M. ROBERT André
Institut Universitaire de Technologie	:
U.E.R. des Lettres et Sciences Humaines	: M. GAUME Maxime
U.E.R. de Médecine	: M. le Docteur CABAL Christian
U.E.R. des Sciences	: M. MONTHEARD Jean-Pierre
U.E.R. des Sciences Economiques	: M. MIFSUD Pierre

UNIVERSITE DE SAINT-ETIENNE

U.E.R. DE MEDECINE

RESPONSABLES D'ENSEIGNEMENT

(COLLEGE A)

1er CYCLE

Anatomie.....	M. le Professeur CUILLERET Jacques
Chimie-Biochimie.....	M. FREY Jacques, Professeur sans chaire
Physiologie.....	M. le Professeur LACOUR Jean-René
	M. COUDERT Jean, M.C.A.

2ème CYCLE

Anatomie Pathologique.....	M. BARIL Alexandre M.C.A.
Anesthésiologie.....	M. VIGNON Henry, M.C.A.
Bactériologie - Virologie.....	Mme GAUDIN Odette, M.C.A.
Cardiologie.....	M. VERNEYRE Henri, M.C.A.
Chirurgie Infantile.....	M. CHAVRIER Yves, M.C.A.
Dermatologie - Vénérologie.....	M. DUVERNE Jean, M.C.A.
Gynécologie et Obstétrique.....	M. LA SELVE Antoine, M.C.A.
Hématologie, Maladies du sang.....	M. BRIZARD Charles, M.C.A.
Hépatologie, Gastro-Entérologie.....	M. FRAISSE Henri, M.C.A.
Médecine Interne.....	M. POTTON François, M.C.A.
Médecine Préventive, Hygiène.....	M. le Professeur RIFFAT Georges
Médecine du Travail.....	M. CABAL Christian, M.C.A.
Néphrologie.....	M. BERTHOUX François, M.C.A.
Neurochirurgie.....	M. DECHAUME Jean-Pierre, M.C.A.
Orthopédie, Traumatologie, Chirurgie plastique et reconstructive.....	M. BOUSQUET Gilles, M.C.A.
Pédiatrie, Génétique Médicale.....	M. le Pr FREYCON Fernand M. LAURAS Benoît, M.C.A.
Psychiatrie d'adultes.....	M. PELLET Jacques, M.C.A.
Radiologie.....	M. RUBET Alain, M.C.A.
Thérapeutique, Réanimation médicale, Rééducation fonctionnelle, Hydrologie..	M. QUENEAU Patrice, M.C.A.
Ophtalmologie.....	M. MAUGERY Jean, M.C.A.

UNIVERSITE CLAUDE BERNARD - LYON I

U.E.R DE MEDECINE DE L'UNIVERSITE DE ST-ETIENNE

(Application de la Convention du 10 mai 1974)

THESE DE : Monsieur DENIS Christian

COMPOSITION DU JURY

<u>PRESIDENT</u> :	Monsieur le Professeur FLANDROIS.....	U.E.R. LYON
<u>ASSESSEURS</u> :	Monsieur le Professeur LACOUR.....	U.E.R. ST-ETIENNE
	Monsieur le Docteur Y. MINAIRE M.C.A....	U.E.R. LYON
	Monsieur le Docteur COUDERT M.C.A.....	U.E.R. ST-ETIENNE

A LA MEMOIRE DE MA MERE

A MON PERE ET A MON FRERE

A MA FAMILLE ET A MES AMIS

A MONSIEUR LE PROFESSEUR R. FLANDROIS

PRESIDENT DU JURY DE CETTE THESE

qu'il trouve ici l'expression de mon profond respect.

A MES JUGES

MONSIEUR LE PROFESSEUR J.R. LACOUR

MONSIEUR LE PROFESSEUR Y. MINAIRE

MONSIEUR LE PROFESSEUR J. COUDERT

qui m'ont fait l'honneur de bien vouloir accepter de me juger.

A L'EQUIPE DU SERVICE D'EXPLORATION FONCTIONNELLE RESPIRATOIRE

MONSIEUR LE PROFESSEUR J.R. LACOUR

Vous avez inspiré et guidé ce travail qui m'a amené à la découverte de la Physiologie de l'exercice musculaire.

Vos encouragements constants et votre dynamisme m'ont apporté une aide efficace.

Soyez assuré de ma sincère reconnaissance et de mon profond respect.

MADAME LE DOCTEUR J. RIFFAT

Votre présence constante et votre gentillesse ont permis d'allier la sympathie à l'efficacité tout au long des expérimentations de laboratoire.

Je ne sais comment vous exprimer toute ma reconnaissance et mes sincères remerciements.

MONSIEUR LE DOCTEUR P. POTY

Ce travail m'a permis de bénéficier de votre aide et de votre grande connaissance des sportifs.

Je vous exprime toute ma reconnaissance et mes remerciements.

MONSIEUR A. GEYSSANT - MADAME D. DORMOY

Je vous remercie pour votre patience et votre dévouement dans les conseils qui sont venus éclairer mon ignorance de la Biochimie de Laboratoire.

A TOUTE L'EQUIPE DU C.A. SAINT-ETIENNE HAND-BALL

SON PRESIDENT : MONSIEUR J. BRECHOTTEAU

SON ENTRAINEUR : MONSIEUR B. DUCHAMP

Tous les joueurs qui ont fait preuve de dynamisme et de sérieux, associés à une disponibilité de chaque instant.

Que tous soient assurés de l'expression de mon amitié et de ma profonde gratitude.

Mes remerciements et ma reconnaissance vont à tous ceux qui par leur présence ou leur générosité ont permis la réalisation de ce travail.

MONSIEUR LE DOCTEUR DIBIE - Médecin de l'Institut National
des Sports.

MONSIEUR DEMENGE - Professeur de Sciences Physiques
au Lycée Claude Fauriel

MONSIEUR MURAT - Entrepreneur d'Electricité

MONSIEUR BRUNON - Technicien du Laboratoire de
langues à l'U.E.R. de Lettres

BERNARD GAUSSIN , BERNARD THERRAT et tous les amis qui
m'ont apporté leur aide.

PLAN

INTRODUCTION

DONNEES BIOCHIMIQUES : BIOENERGETIQUE ET SUBSTRATS ENERGETIQUES

- 1 - ADENOSINE TRIPHOSPHATE
- 2 - DEGRADATION DU PHOSPHAGENE
- 3 - LA GLYCOLYSE
 - a) Les oxydations
 - b) La glycolyse anaérobie lactique
 - c) La glycolyse aérobie
- 4 - CONCLUSION

ETUDE PHYSIOLOGIQUE DES PROCESSUS ENERGETIQUES

A - LE METABOLISME AEROBIE

- 1 - DEFINITION
- 2 - RAPPEL DES ELEMENTS LIMITANTS DE LA CONSOMMATION D'OXYGENE
- 3 - CONSOMMATION MAXIMALE D'OXYGENE
 - a) Définition
 - b) Valeur moyenne des individus sédentaires
 - c) Consommation maximale d'oxygène et fréquence cardiaque en fonction de l'âge
 - d) Consommation d'oxygène et fréquence cardiaque en fonction de l'intensité de l'exercice
 - e) Evolution de la consommation d'oxygène en fonction de l'intensité et de la durée de l'exercice
 - f) Répartition des valeurs de $\dot{V}O_2$ max suivant le type de sport pratiqué.

B - LE METABOLISME ANAEROBIE

I - Métabolisme anaérobie lactique

- 1 - GENERALITES
- 2 - NIVEAU ENERGETIQUE D'APPARITION DU METABOLISME LACTIQUE
- 3 - PRODUCTION MAXIMALE D'ACIDE LACTIQUE
- 4 - EVOLUTION DU LACTATE APRES L'EXERCICE

II - Métabolisme anaérobie alactique

- 1 - DEFINITION ET GENERALITES
- 2 - EVOLUTION DU PHOSPHAGENE MUSCULAIRE PENDANT L'EXERCICE
- 3 - ESTIMATION DE LA PUISSANCE MAXIMALE ANAEROBIE ALACTIQUE

III - La dette d'oxygène

- 1 - DEFINITIONS - GENERALITES
- 2 - CINETIQUE DE LA DETTE EN FONCTION DU TYPE D'EXERCICE
PRATIQUE

C - INTERET DE L'ETUDE SIMULTANEE DES PROCESSUS AEROBIES ET ANAEROBIES

- 1 - INFLUENCE DE LA DUREE DES INTERVALLES EXERCICE-REPOS
- 2 - INFLUENCE DE LA PUISSANCE FOURNIE
- 3 - CONCLUSIONS PRATIQUES

METHODOLOGIE

A - L'EQUIPE

- I - Les sujets
- II - Les entraînements
 - 1) L'ENTRAINEMENT DU MARDI
 - 2) LA SEANCE DU JEUDI

III - Les rencontres

B - LES EPREUVES DE LABORATOIRE

I - Le matériel employé

II - Réalisation pratique des épreuves

1 - MESURE DE $\dot{V}O_2$ MAX

- a) Les exercices préliminaires
- b) L'épreuve maximale

2 - MESURE DE LA DETTE MAXIMALE D'OXYGENE

- a) L'échauffement
- b) Exercice supra-maximal
- c) La récupération

3 - DOSAGE DU LACTATE SANGUIN

- a) Condition de prélèvement
- b) Méthode de dosage

C - LES EXPERIMENTATIONS SUR LE TERRAIN

1) TELEMETRIE

- a) Matériel utilisé
- b) Conditions d'expérimentations

2) DETERMINATION DE LA PUISSANCE MUSCULAIRE INSTANTANEE

- a) Fondement théorique
- b) Conditions expérimentales
- c) Conditions expérimentales de notre étude

LES RESULTATS

I - Les sujets

II - Epreuves pratiques au laboratoire

- 1) MESURE DE LA CONSOMMATION MAXIMALE D'OXYGENE
- 2) MESURE DE LA DETTE MAXIMALE EFFECTIVE D'OXYGENE
- 3) MESURE DE LA PUISSANCE MAXIMALE INSTANTANEE

III - Mesures pratiques sur le terrain

- 1) MESURE DES INTERVALLES EXERCICE-REPOS LORS DES RENCONTRES
- 2) ENREGISTREMENT TELEMETRIQUE DE LA FREQUENCE CARDIAQUE
 - a) Entraînement
 - b) Rencontres

DISCUSSION DES RESULTATS

A - CRITIQUE DES METHODES UTILISEES

- 1) MESURE DE $\dot{V}O_2$ MAX
 - a) Choix de la méthode
 - b) Critères de validité
- 2) MESURE DE LA DETTE MAXIMALE D'OXYGENE
 - a) Choix de la puissance d'exercice
 - b) Pourcentage de $\dot{V}O_2$ max atteint en fin d'exercice
 - c) Détermination de $\dot{V}O_2$ de repos
 - d) Durée de la période de récupération
- 3) DOSAGE DU LACTATE SANGUIN
 - a) Mode de prélèvement
 - b) Détermination de l'erreur incombant au dosage
- 4) MESURE DE LA PUISSANCE MUSCULAIRE INSTANTANEE
 - a) Emploi des contacts mécaniques
 - b) Intérêt de la précision au 1/1000ème de seconde
- 5) DETERMINATION DU TYPE D'EXERCICE PENDANT LE JEU
 - a) L'appréciation du type de course
 - b) Evaluation de l'erreur de la mesure
- 6) ENREGISTREMENT DE LA FREQUENCE CARDIAQUE

B - ANALYSE DES RESULTATS

I - Valeur comparative des résultats

- 1) $\dot{V}O_2$ MAX
- 2) DETTE MAXIMALE D'OXYGENE
- 3) PUISSANCE MAXIMALE INSTANTANEE

II - Conclusions pratiques

- 1) CARACTERISTIQUES ENERGETIQUES REQUISES PAR LE HAND-BALL
- 2) CONCLUSIONS PRATIQUES CONCERNANT LES ENTRAINEMENTS
- 3) LE HAND-BALL ET LA PHYSIOLOGIE
- 4) ANALYSE PROSPECTIVE

CONCLUSIONS

BIBLIOGRAPHIE

INTRODUCTION

Le Hand-Ball, sport collectif de contact, met en compétition des équipes de sept joueurs. Ceux-ci doivent essayer, par une propulsion des bras de faire pénétrer le ballon dans le but de l'équipe rivale. Les dimensions modestes du terrain (40 m x 20 m en moyenne) et le fait que les compétitions se déroulent en saison hivernale, rendent maintenant habituelle la pratique du Hand-Ball en salle.

Les diverses situations et conditions de jeu sont réglées par :

- le but à atteindre
- les limites du terrain
- les trajectoires du ballon
- les actions réactions des adversaires et des partenaires.

Ces différents facteurs exigent :

. La coopération entre partenaire en vue d'une action collective cohérente. Cette coopération est facilitée par l'application de schémas de jeu offensifs et défensifs assimilés, adoptés et adaptés par l'équipe.

. Le choix des gestes à utiliser dans la situation du jeu.

. La mise en oeuvre de qualités athlétiques qui permettent conformément aux règles du jeu et du sport, l'opposition physique face à l'adversaire et l'ascendant physique d'une équipe sur l'autre.

Coopération entre partenaire et choix du geste sont directement reliés à la technique et à la tactique individuelle et collective.

Les qualités athlétiques du joueur de Hand-Ball sont essentiellement représentées par les caractères morphologiques (taille, poids, rapports segmentaires), la vitesse, la détente, la force, l'aptitude à réaliser des exercices brefs mais violents et répétés.

Chacune de ces caractéristiques peut faire l'objet d'une mesure objective et par là d'une description des facteurs physiologiques requis ou provoqués par la pratique de ce sport.

Le joueur de Hand-Ball évolue par des déplacements extrêmement variables dans leur vitesse, leur durée et leur fréquence. Il s'agit essentiellement de courses, de sauts et de déplacements latéraux. Il est important de souligner que, lors d'une rencontre d'une heure (2 mi-temps de 30 mn), chaque joueur évolue moins de 2 minutes au total en possession de la balle. Le jeu actif sans ballon représente donc la facette essentielle de ce sport (au même titre, par ailleurs, que pour les autres sports collectifs).

Le but de ce travail est d'étudier l'aspect physiologique du Hand-Ball à travers une équipe locale (C.A. Saint-Etienne) jouant au niveau régional et se préparant à pratiquer au niveau national pour la saison prochaine.

Nous nous sommes attachés à résumer dans une première partie, les différentes données théoriques et expérimentales apportées par l'étude de l'exercice musculaire et ses conséquences bioénergétiques.

Nos expérimentations ont été réalisées en laboratoire, pendant les entraînements et pendant les rencontres, et orientées vers une approche énergétique. L'étude des caractéristiques de force dynamique ou statique des membres supérieurs n'a pas été incluse dans ce travail.

La tentative d'une conclusion théorique concernant l'aptitude physique des joueurs face aux besoins énergétiques requis, le niveau énergétique des entraînements et des rencontres a été réalisées à l'aide des différents résultats obtenus.

DONNEES BIOCHIMIQUES : BIOENERGETIQUES ET SUBSTRATS ENERGETIQUES

1 - ADENOSINE TRIPHOSPHATE

Le travail musculaire est rendu possible par la transformation en énergie mécanique de l'énergie potentielle chimique contenue dans les molécules d'adénosine triphosphate.

L'ATP libère son énergie en perdant ses radicaux phosphates et en se transformant en molécules de moindre niveau énergétique : adénosine diphosphate (ADP) et adénosine monophosphate (AMP). La transformation d'une mole d'ATP en une mole d'ADP s'accompagne de la libération d'une quantité d'énergie comprise entre 7 et 13 Kcal.



Une mole d'ATP pèse 507 grammes. Chaque kilogramme de muscle frais contient 3 grammes d'ATP (KARLSSON 1971). Pour un exercice musculaire faisant intervenir une masse musculaire de 20 Kg, 60 g d'ATP sont donc disponibles, ce qui représente une réserve de 1,2 Kcal.

D'après KARLSSON et coll (1967), l'énergie dépensée par mètre parcouru, lors de la course à pied, varie de 0,10 à 0,30 Kcal/mètre en fonction de la vitesse.

Ainsi, une course de 15 m réalisée à vitesse maximale, équivaut à une dépense énergétique de 4,5 Kcal. Ce besoin énergétique dépasse largement les réserves musculaires d'ATP.

Divers systèmes de recharge énergétique permettent le prolongement de l'effort musculaire.

2 - LA DEGRADATION DU PHOSPHAGENE

a) Définition

Le phosphagène représente l'ensemble des composés permettant une resynthèse instantanée de l'ATP. Ces composés sont l'ADP et la créatine phosphate (CP).

- L'ADP, métabolite principal, peut participer à la resynthèse de l'ATP suivant la réaction



- La créatine phosphate, substrat à haute énergie, présent dans le muscle, mais non utilisable directement, intervient aussi dans cette synthèse.



b) Les caractéristiques de ce processus sont :

- L'instantanéité
- Le débit important : 100 à 120 Kcal/mn
- Une capacité réduite : 5 à 6 Kcal

La dégradation du phosphagène n'est donc efficace que pendant quelques secondes, mais permet l'installation des processus de dégradation des substrats énergétiques.

3 - LA GLYCOLYSE

La dégradation des composés glucidiques en réserve dans le muscle sous forme de glycogène, obéit aux mécanismes d'oxydation.

a) Les oxydations

Ces réactions peuvent être représentées par l'équation :



ou A est le composé oxydé (donneur d'hydrogène)

B est le composé réduit (accepteur d'hydrogène)

Ces réactions ne se déroulent à l'échelon cellulaire qu'avec la présence d'un transporteur d'oxygène et d'un catalyseur (association enzyme - coenzyme).

b) La glycolyse anaérobie lactique

- Le glycogène est transformé en acide pyruvique par l'intermédiaire de la glucose - 6 - phosphate. Cette étape énergétique ne nécessite pas la présence d'oxygène, l'oxydant (ou composé réduit) étant le nicotinamide adénine dinucléotide (NAD).

Les réserves de NAD diminuent au profit de la formation de NADH, H^+ . La réoxydation de NADH, H^+ permet la reconstitution des stocks de NAD et s'accompagne de la formation d'acide lactique à partir de l'acide pyruvique.

- L'utilisation de 180 g de glycogène permet la resynthèse de 3 ATP et donc la libération d'environ 30 Kcal. La concentration de glycogène musculaire atteint normalement 1,5 à 2 g pour 100 g de muscle frais.

Pour un exercice exigeant la participation de 20 Kg de muscle, il serait donc possible d'obtenir une libération d'environ 60 Kcal par l'intermédiaire de la glycolyse anaérobie, dégradant au total 350 g de glycogène et aboutissant à la formation de 350 g d'acide lactique.

Cependant les dosages sanguins et musculaires réalisés par KARLSSON (1971) sur un individu bien entraîné semblent montrer que la quantité maximale de lactate ne peut dépasser 135 g. Une quantité supérieure de lactate provoque une acidose musculaire telle que les processus enzymatiques sont inhibés et l'exercice insoutenable.

Il est donc possible de fixer la capacité maximale des processus anaérobies lactiques à 22,5 Kcal pour un sujet normal.

- Les caractéristiques de la glycolyse anaérobie sont donc les suivantes :

- . déclenchement rapide, dès que les réserves musculaires d'ATP diminuent.

- . intervention préférentielle dans les fibres musculaires blanches à cytoplasme abondant.

- . débit s'élevant à 50 Kcal/mn

- . capacité réduite à 22,5 Kcal

D'après KARLSSON et coll (1967), une course à pied à vitesse maximale (représentant donc une dépense énergétique de 0,30 Kcal/mètre parcouru) ne peut être soutenue que sur une distance inférieure à 100 m (7 Kcal fournies par la dégradation du phosphagène et 22,5 Kcal d'origine anaérobie lactique).

L'énergie aérobie va donc permettre de poursuivre une course continue représentant une distance supérieure, ou de prendre en charge une partie de l'énergie dépensée sur des courses à vitesse maximale répétées sur des distances courtes (rythme de course du Hand-Ball).

c) La glycolyse aérobie

L'exercice aérobie permet la dégradation complète du glycogène en gaz carbonique et eau. Le NADH, H^+ est oxydé, en présence d'oxygène, dans les mitochondries, lieu du cycle de KREBS. Le cycle de KREBS est alimenté par ailleurs par l'acétyl coenzyme A provenant de la dégradation des lipides.

- La dégradation de 2 moles de pyruvate permet de resynthétiser 36 Moles d'ATP.

- Origine de l'oxygène :

Les muscles disposent d'un stock d'oxygène fixé sur la myoglobine. La quantité totale d'oxygène liée est évaluée à 0,5 litre.

Pour un exercice demandant par exemple un apport d'oxygène de 3 litres par minute (15 Kcal/mn), les réserves disparaissent en quelques dizaines de secondes et les cellules musculaires font appel à l'oxygène lié à l'hémoglobine circulante.

- Les caractéristiques de la glycolyse aérobie sont donc les suivantes :

- latence d'apparition de l'oxygène sanguin en quantité élevée au niveau musculaire (adaptation cardio-respiratoire)

- débit moyen s'élevant à 15 - 20 Kcal/mn (pouvant dépasser 25 Kcal/mn chez des sportifs d'élite pratiquant des efforts intenses et de longue durée)

- capacité qui permet la couverture énergétique des efforts longs. Par exemple, un coureur de marathon utilise au minimum 2500 à 3000 Kcal.

4 - CONCLUSION

Les conditions d'utilisation des substrats énergétiques pourvoyeurs d'ATP indispensable à l'exercice musculaire peuvent donc être séparés en trois groupes :

- Processus aérobie

- Processus anaérobies avec formation d'acide lactique

- Processus anaérobies sans formation d'acide lactique : dégradation du phosphagène.

Il semble actuellement que ces trois conditions suffisent à expliquer le déroulement d'un exercice musculaire dans des circonstances définies de durée et d'intensité (fig. 1).

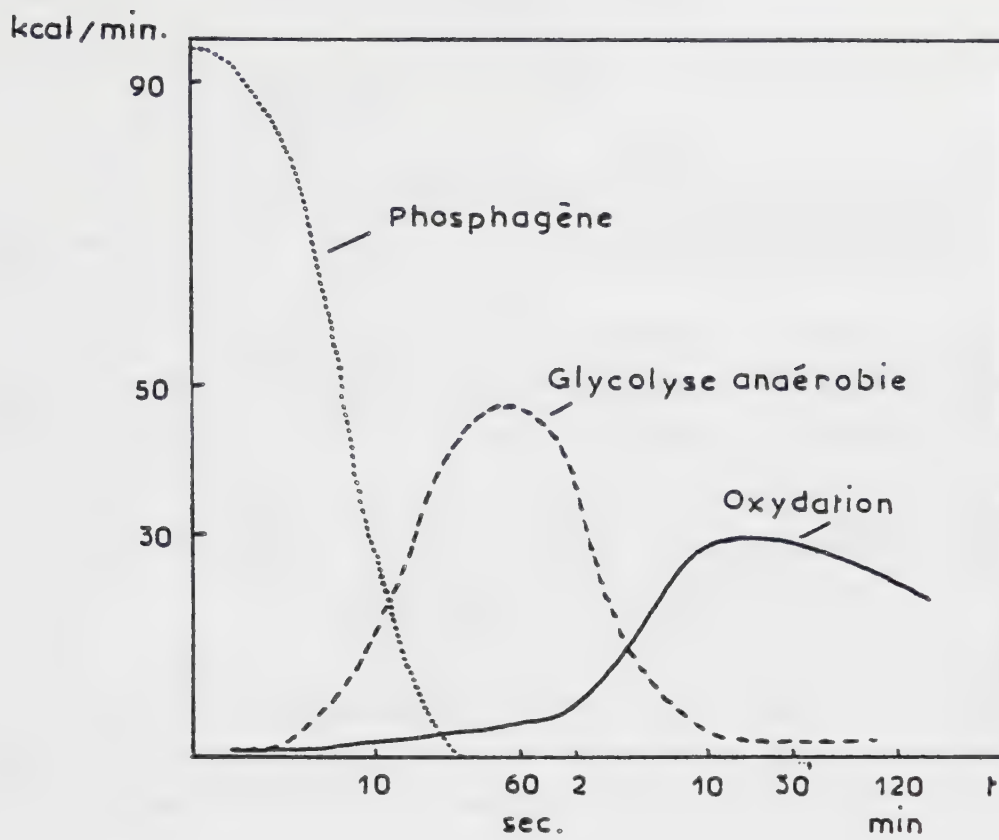


Figure 1

Caractéristiques des trois processus d'apport d'énergie au muscle (D'après HOWALD, 1974)

ETUDE PHYSIOLOGIQUE DES PROCESSUS ENERGETIQUES

A - LE METABOLISME AEROBIE

1 - DEFINITION

L'oxygène de l'air ambiant est transporté jusqu'aux muscles par le système pulmonaire et circulatoire, et consommé par la chaîne oxydative au niveau des cellules musculaires.

Aux différents niveaux de passage de l'oxygène (poumons, membrane alvéolo capillaire, globules rouges, diffusion tissulaire), des phénomènes sont susceptibles de limiter l'apport quantitatif d'oxygène aux muscles.

2 - RAPPEL DES ELEMENTS LIMITANTS DE LA CONSOMMATION D'OXYGENE

a) La capacité ventilatoire des poumons

Variante de 5 à 6 litres par minute au repos et pouvant atteindre 200 litres par minute pendant un exercice maximal chez un sujet présentant une grande aptitude physique, le débit ventilatoire ne constitue normalement pas un facteur limitant de la consommation d'oxygène.

b) La diffusion alvéolaire de l'oxygène (DL_{O_2})

De 20 ml/mn/mmHg au repos, DL_{O_2} augmente jusqu'à 62 ml/mn/mmHg à l'exercice pour une consommation d'oxygène dépassant 4 litres par minute (HOLMGREN et PO ÅSTRAND 1966).

La croissance de DL_{O_2} , ralentit progressivement sans toutefois atteindre un état stable en fin d'exercice. DL_{O_2} ne semble donc pas impliqué dans la limitation de la consommation d'oxygène.

c) L'aptitude fonctionnelle du cœur

Cette aptitude dépend du débit cardiaque qui résulte du produit de la fréquence cardiaque (FC) par le volume systolique (VS)

$$\dot{Q} = VS \times FC$$

Une étude de SALTIN (tableau 1) a permis la mesure de différentes valeurs chez des sujets relativement sédentaires, âgés de 20 à 25 ans, avant et après une période de 2 à 4 mois d'entraînement intense. En parallèle ont été étudiés les mêmes paramètres physiologiques dans un groupe de sportifs

Tableau 1

	Deux mois d'entraînement		Sujets d'élite (endurance)
	Avant	Après	
Consommation d'oxygène l/mn	3,1	3,6	5,6
Consommation d'oxygène ml/min/Kg	42	49	75
Différence artério-veineuse pour l'oxygène (vol. p. cent)	14,4	15,5	15,6
Débit cardiaque l/min	21,5	23,2	36
Fréquence cardiaque max. puls/min	196	192	190
Volume systolique ml	110	122	189
Volume cardiaque ml	740	820	1140
Volume sanguin	4,3	4,6	

d'élite pratiquant des spécialités d'endurance.

Il apparaît d'après ces résultats qu'un entraînement améliorant l'aptitude à consommer l'oxygène permet l'augmentation concomitante du débit cardiaque. Pour un état d'aptitude et d'entraînement physique donné correspond donc un débit cardiaque maximal qui intervient pour limiter l'apport sanguin aux masses musculaires et donc pour limiter la consommation d'oxygène.

L'accroissement du débit cardiaque se développe par l'intermédiaire d'un accroissement du volume systolique. Une faible diminution de la fréquence cardiaque maximale vient légèrement réduire cet accroissement.

Il est donc possible de conclure que pour des sujets de même tranche d'âge, l'aptitude à exécuter des exercices maximaux atteignant des puissances très différentes suivant les sujets, est régie par l'amplitude de l'augmentation du volume d'éjection systolique. Il faut cependant souligner, comme l'ont montré ÅSTRAND et coll. (1964) qu'à un exercice maximal donné correspondent une fréquence cardiaque et un volume systolique maximaux. Aucun de ces facteurs (FC VS et donc $\dot{Q}$) ne régresse lorsque l'intensité de l'exercice augmente.

d) La capacité du sang à transporter l'oxygène

Le contenu artériel en oxygène ne peut pas dépasser 21 vol p. cent. Le contenu en oxygène du sang veineux ne descend guère au dessous de 3 à 4 vol p. cent chez les sujets très entraînés. Ce facteur joue donc très peu, normalement, dans les variations de la consommation maximale d'oxygène.

e) L'aptitude des cellules musculaires à consommer l'oxygène

La masse musculaire active lors d'un exercice intervient sur l'aspect quantitatif de la consommation d'oxygène.

Un travail musculaire maximal exécuté par les membres supérieurs consomme moins d'oxygène qu'un travail maximal au niveau des membres inférieurs. Cependant la différence s'amortit lorsque les membres supérieurs sont entraînés préférentiellement; nage : (CHARBONNIER, thèse lyon 1974), aviron: (HAGERMAN et coll. 1975).

D'autre part, la répartition des fibres musculaires rouges et blanches est différente suivant les individus. Pour une même masse musculaire active, un sujet présentant une répartition préférentielle de fibres rouges consomme donc plus d'oxygène qu'un sujet dont les muscles contiennent une part plus importante de fibres blanches. Cette répartition est fixée et peu modifiable.

Il semble donc qu'un facteur génétique intervienne pour fixer un niveau individuel d'aptitude à l'effort musculaire aérobie, niveau qu'il sera impossible de dépasser après un entraînement intensif et adapté, amenant la capacité de l'individu à son niveau maximal.

3 - CONSOMMATION MAXIMALE D'OXYGENE

a) Définition

La mesure de la consommation d'oxygène au repos varie suivant les sujets (age, taille, poids) de 0,2 à 0,3 litre par minute.

CHRISTENSEN en 1932 a montré la relation quantitative qui existe entre la puissance fournie lors d'un exercice des membres inférieurs et l'augmentation de la consommation d'oxygène.

Toute augmentation de 427 kgm/min soit 1 Kcal/mn, de la puissance fournie, détermine une augmentation de la consommation d'oxygène de 0,960 litre par minute. L'accroissement de la consommation d'oxygène reste proportionnel à la puissance fournie. A partir d'une puissance variable pour chaque sujet, la consommation d'oxygène devient stable et toute augmentation

de puissance ne détermine plus d'augmentation de consommation d'oxygène.

Ainsi se définit la consommation maximale d'oxygène, valeur atteinte pour une puissance définie comme la puissance maximale aérobie.

b) Valeur moyenne des individus sédentaires

Chez le sujet masculin de 20 ans, la consommation maximale d'oxygène ($\dot{V}O_2$ max) s'élève à 3 litres par minute ou 45 ml/kg/mn (P.O. ÅSTRAND, 1952 FLANDROIS et coll., 1966). Cette consommation maximale est en général de 10 à 20 % plus faible chez la femme. Cette valeur diminue régulièrement avec l'âge. (I. ÅSTRAND 1960, 1973).

c) Consommation maximale d'oxygène et fréquence cardiaque en fonction de l'âge.

P.O. ÅSTRAND (1952) a montré en effet que la fréquence cardiaque maximale varie en fonction de l'âge. Pour une moyenne de 210 pulsations/minute à l'âge de 10 ans, elle atteint 160/minute à 65 ans (avec un intervalle de confiance de 95 % à $\pm$ 10 pulsations par minute pour chaque tranche d'âge).

I. ÅSTRAND (1973) a vérifié cette décroissance de la FC sur des sujets ayant exécuté le même exercice à 21 ans d'intervalle. Au cours de cette période ou l'activité physique des sujets n'a pas été régulièrement contrôlée, la fréquence cardiaque maximale diminue de 12 à 15 % et la $\dot{V}O_2$ max diminue de 20 % (avec de grosses variations individuelles).

d) $\dot{V}O_2$ et fréquence cardiaque en fonction de l'intensité de l'exercice

Il est généralement admis qu'il existe une relation linéaire entre la consommation d'oxygène et la fréquence cardiaque. Lorsque la consommation maximale d'oxygène est atteinte, la fréquence cardiaque n'augmente plus, elle a atteint son niveau maximal.

Il existe cependant de nombreuses exceptions : dans de nombreux cas, la consommation d'oxygène augmente relativement plus que la fréquence cardiaque lorsque l'exercice devient très intense.

Dans ces conditions, l'étude de la fréquence cardiaque pendant l'exercice, chez un sportif dont la FC maximale est connue, permet d'évaluer grossièrement la consommation d'oxygène en pourcentage de $\dot{V}O_2$ max, à un moment donné.

Cette relation $FC/\dot{V}O_2$ est en outre utilisée pour l'estimation indirecte de $\dot{V}O_2$ max à partir d'exercices infra maximaux (50 % $\dot{V}O_2$ max) (épreuve d'ÅSTRAND - RYHMING).

e) Evolution de la consommation d'oxygène en fonction de l'intensité et de la durée de l'exercice.

Elle a été étudiée par ÅSTRAND et SALTIN (1961) (fig. 2). Le sujet étudié présente une $\dot{V}O_2$ max de 4,1 l/mn atteinte pour un exercice d'une puissance de 300 Watts après un échauffement de 10 mn.

Le but de l'expérimentation est d'étudier la cinétique de $\dot{V}O_2$ pour des puissances supérieures à la puissance maximale

- à 300 watts, $\dot{V}O_2$ max est atteint à la 6ème mn de l'exercice
- à 350 watts, $\dot{V}O_2$ max est atteint à la 3ème mn " " "
- à 400 watts, $\dot{V}O_2$ max est atteint à la 1 mn 45 s " "
- à 450 watts, $\dot{V}O_2$ max est atteint à la 1 mn 25 s " "

Quelle que soit la puissance fournie, même si celle-ci dépasse très largement la puissance maximale aérobie (150 %), la consommation maximale d'oxygène ne peut être atteinte qu'après un certain délai.

Pendant ce délai, l'énergie aérobie fournie est insuffisante à couvrir les besoins énergétiques requis par l'exercice. La quantité d'énergie complémentaire est fournie par :

- la dégradation du phosphagène
- l'oxygène de la myoglobine et du sang veineux
- la glycolyse anaérobie

Au cours de l'exercice se constitue donc un "déficit en oxygène" qu'il sera nécessaire de payer lors de la récupération.

- Si l'exercice se déroule à une puissance aérobie submaximale ou maximale, le déficit n'est contracté qu'en début d'effort et devient nul lorsque l'état stable est atteint.

- Si l'exercice se déroule à une puissance supramaximale, le déficit augmente tout au long de l'exercice, les processus aérobie ne pouvant couvrir toute la demande énergétique (fig. 3).

Cette expérimentation permet aussi de montrer que lorsque $\dot{V}O_2$ max est atteint, l'épuisement survient rapidement. Un sujet correctement entraîné ne peut fournir un exercice correspondant à sa puissance maximale aérobie pendant un temps supérieur à 10 - 13 mn.

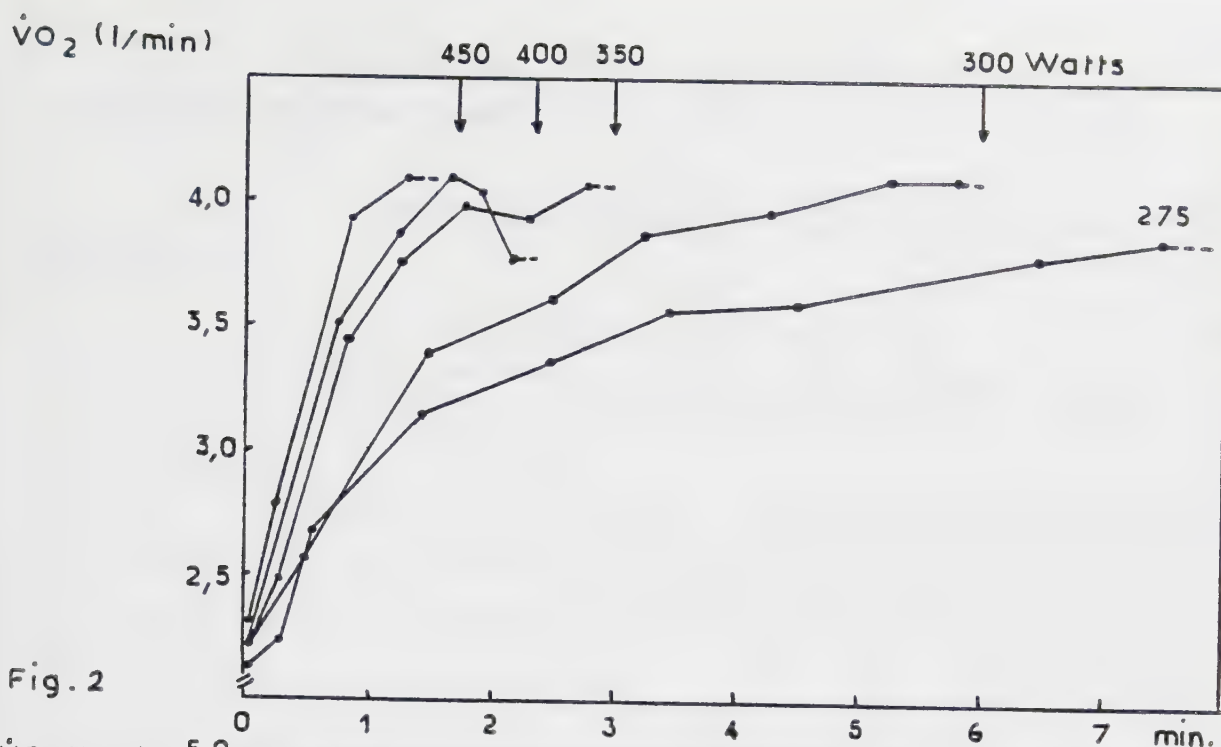


Fig. 2

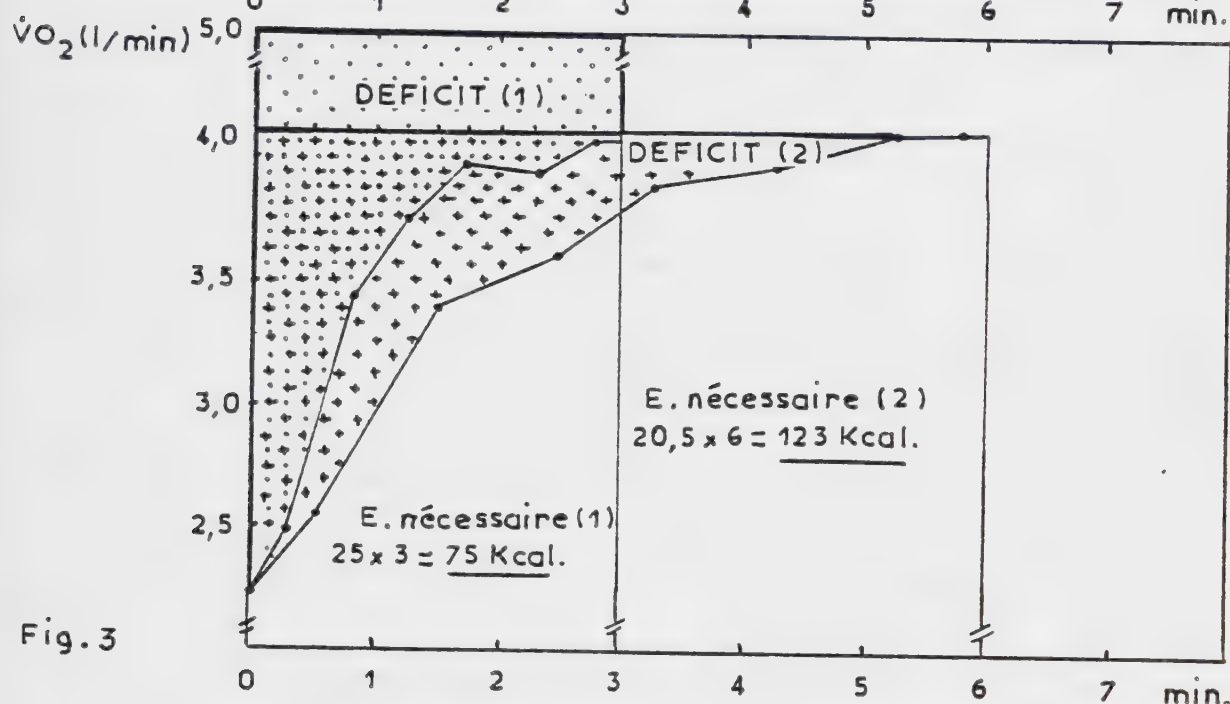


Fig. 3

Figure 2

Evolution en fonction du temps de la consommation d'oxygène ($\dot{V}O_2$), chez un sujet qui fournit des exercices de puissances différentes après un échauffement de 10 minutes. Les flèches indiquent la survenue de l'épuisement (D'après P.O. ÅSTRAND et SALTIN, 1961)

Figure 3

Représentation schématique des déficits en oxygène au cours d'un exercice maximal (20,5 Kcal/min) et d'un exercice supra-maximal (25 Kcal/min).

Le temps maximum pendant lequel un sujet peut maintenir un pourcentage donné de $\dot{V}O_2$ max permet de déterminer son endurance aérobie.

f) Répartition des valeurs de $\dot{V}O_2$ max suivant le type de sport pratiqué.

Si les valeurs atteintes pour les personnes relativement sédentaires sont très inférieures à celles mesurées chez les sportifs entraînés, il existe aussi de grosses différences qui sont reliées à la discipline sportives pratiquée.

Les valeurs les plus élevées sont habituellement mesurées chez les sportifs pratiquant une discipline exigeant un exercice long et soutenu (les valeurs données ci-dessous sont obtenues par mesure directe).

Ski de fond :

(BERGH U. 1974) Equipe nationale suédoise 1973

8 sujets - moyenne 5,75 l/mn

84 ml/kg/mn

(HANSON J.S. 1974) Equipe nationale des USA

7 sujets - moyenne 5,48 l/mn

75 ml/kg/mn

valeurs extrêmes : 4,96 → 6,22 l/mn

65,7 → 88,3 ml/kg/mn

(GRESSIER M. 1975) Equipe nationale française

4,7 → 5,45 l/mn

66 → 77 ml/kg/mn

Course à pied. (KARLSSON et coll. 1967)

Coureurs internationaux et de niveau national suédois

Course d'orientation (B. SALTIN 1972)

4,1 → 6,3 l/mn

68 → 83 ml/kg/mn

Fond : 3000 m et au delà

4,4 → 5,5 l/mn

75 → 85 ml/kg/mn

Demi-fond : 800 - 1500 m

5 —→ 5,6 l/mn

74 —→ 76 ml/kg/mn

Sprint : 200 - 400 m

4,4 —→ 4,7 l/mn

64 —→ 67 ml/kg/mn

Cyclisme : PARNAT et coll. (1975) (URSS)

4,64 —→ 5,30 l/mn

65,4 —→ 73 ml/kg/mn

Aviron : HAGERMAN et coll (1975 (équipe nationale USA)

5,8 l/mn en moyenne

66,2 ml/kg/mn

DURAND BAILLOUD (1975) rameurs français, niveau prépara-

tion olympique

4,65 l/mn

54,5 ml/kg/mn

Tennis de table : A. LUNDIN 1973 - joueurs suédois internationaux (1973).

3,60 —→ 5,06 l/mn

61,9 —→ 70,3 ml/kg/mn

Basket-ball : COLEMAN et coll. (1974) équipe universitaire USA

42,53 ml/kg/mn —→ 56,47 ml/kg/mn

PARNAT et coll. (1975) (URSS)

4,65 —→ 4,97 l/mn

53,5 —→ 57,1 ml/kg/mn

Foot-ball : équipe nationale suédoise (AGNEVIK 1970)

50 —→ 69 ml/kg/mn

3,32 l/mn —→ 5,19 l/mn

Volley-Ball : PARNAT et coll. 1975

4,42 —→ 4,66 l/mn

55,1 —→ 56,7 ml/kg/mn

Il apparaît que des disciplines collectives et celles exigeant des exercices de courte durée ne développent pas des aptitudes aérobies aussi élevées que les disciplines de longue durée.

L'exemple caricatural est celui de l'haltérophilie (SALTIN et ÅSTRAND, 1967). Les valeurs maximales obtenues ne dépassent pas 56 ml/kg/mn pour ce sport qui demande des efforts extrêmement violents en des temps très

très courts, ne pouvant être pris en charge par les processus aérobie : l'aptitude sportive est donc dictée par d'autres facteurs (masse musculaire, force statique et dynamique...).

Il est donc important de considérer les valeurs de $\dot{V}O_2$ max relativement aux sports pratiqués et de ne pas utiliser les seules mesures de capacité aérobie pour l'étude physiologique de l'aptitude physique.

g) Conclusion

L'aptitude d'un sujet à utiliser le métabolisme aérobie peut être étudié par :

- la mesure de la consommation maximale d'oxygène en laboratoire ou lors de l'exercice sportif, quand celui-ci le permet

- la mesure de l'endurance aérobie définit par le pourcentage maximum de $\dot{V}O_2$ utilisable pour un effort de longue durée déterminée.

L'estimation indirecte du niveau énergétique aérobie de l'exercice peut en outre être réalisée par la mesure de la fréquence cardiaque.

B - LE METABOLISME ANAEROBIE

Le métabolisme anaérobie regroupe les processus de dégradation alactique du phosphagène et la glycolyse anaérobie lactique.

I - METABOLISME ANAEROBIE LACTIQUE

1 - Généralités -----

Le témoin d'utilisation du métabolisme anaérobie lactique par les fibres musculaires est l'acide lactique ou lactate.

Le lactate se concentre au niveau musculaire où il peut être dosé par l'intermédiaire d'une biopsie, et diffuse dans le sang circulant et les liquides extra-cellulaires. Du fait qu'elle est difficile à apprécier, la diffusion du lactate dans les liquides de l'organisme représente un obstacle à l'évaluation de la quantité effective produite. L'augmentation franche des taux musculaires et sanguins est la seule marque qualitative de l'exercice anaérobie lactique.

Il n'existe pas de relation directe entre les taux musculaires et sanguins lors de prélèvements réalisés au même moment. Il apparaît simplement que dès la fin de l'exercice anaérobie le lactate musculaire est significativement plus élevé que le taux sanguin (de 1,5 à 5 fois) (HULTMANN 1967). Secondairement, le phénomène de diffusion permet d'amortir la différence.

L'épuisement musculaire douloureux à la suite d'un exercice intense semble bien dû, pour une certaine part, à la formation de lactate, à la baisse de pH et aux altérations du fonctionnement enzymatique qui en résultent.

2 - Niveau énergétique d'apparition du métabolisme anaérobie -----

lactique.

Il s'agit de définir à partir de quel pourcentage de la puissance maximale aérobie apparaît une concentration sanguine ou musculaire de lactate significativement élevée par rapport à la concentration de repos.

a - Hermansen et Stensvold (1972)

ont étudié chez 4 sujets féminins et 3 sujets masculins bien entraînés, la concentration sanguine de lactate au cours d'exercices effectués sur tapis

roulant, d'une durée de 30 mn, représentant une puissance s'élevant à 30, 60, 70, 80 % de la puissance maximale aérobie.

Cette étude montre qu'il n'existe pas d'accroissement notable de la concentration sanguine du lactate pendant une course régulière lorsque les puissances développées s'échelonnent entre 30 et 70 % (fig. 4) des puissances maximales aérobies respectives des sujets.

Cette observation est en opposition avec les résultats d'autres investigations (WYNDHAM et coll., 1965, WILLIAMS et coll. 1968) faisant intervenir des sujets non entraînés et effectuant les exercices sur cycloergomètre, alors que d'autres auteurs (SAIKI et coll. 1967, COSTILL et coll. 1971) obtiennent des résultats équivalents à HERMANSEN en utilisant un tapis roulant. HERMANSEN et SALTIN (1969) montrent par ailleurs que la concentration sanguine du lactate, pendant un exercice submaximal sur tapis roulant, atteint un niveau moins élevé que pour un exercice de même puissance relative réalisé sur cycloergomètre.

Une autre étude d'HERMANSEN et SALTIN (1967) montre que les sujets bien entraînés produisent moins de lactate que les sujets non entraînés, pour des exercices réalisés à des puissances relatives identiques (même pourcentage de puissance maximale aérobie) (fig. 5).

b - Dosage du lactate musculaire

L'expérimentation de KARLSSON et coll. (1972) approche l'analyse du métabolisme anaérobie lactique et utilise pour cela des biopsies musculaires pratiquées sur un groupe de 14 sujets dont l'entraînement (à visée aérobie principale) est échelonné régulièrement sur sept mois. Des prélèvements, musculaires et sanguins, sont pratiqués avant la période d'entraînement et au bout de 3 et 7 mois d'entraînement, chaque contrôle étant effectué au repos, lors d'un exercice standard de 150 watts, lors d'un exercice submaximal à 85 % $\dot{V}O_2$ max et lors d'un exercice maximum amenant à l'épuisement en 5 minutes (donc un peu supérieur à $\dot{V}O_2$ max).

Les résultats indiquent que :

- le seuil critique de production du lactate se situe à partir de 50 % de la puissance maximale aérobie (ce résultat peut être mis en opposition à celui d'HERMANSEN qui fixe le seuil critique à 60 - 70 % chez le sujet entraîné, en considérant le lactate sanguin).

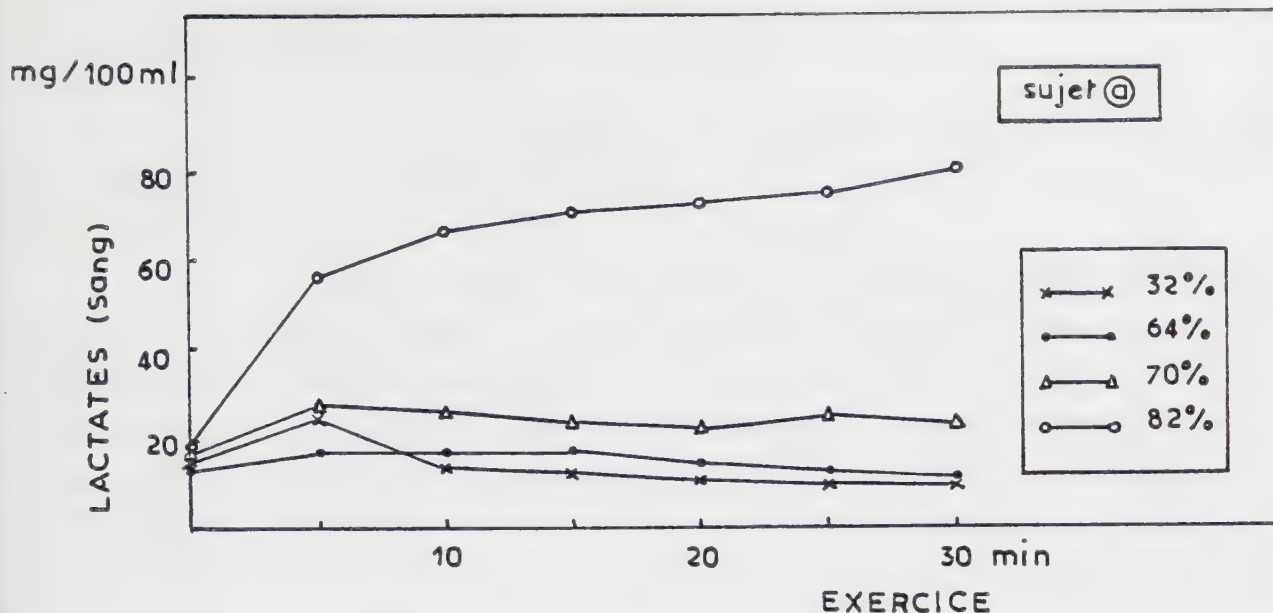


Figure 4 : Concentration sanguine du lactate d'un sujet masculin bien entraîné ($\dot{V}O_2 \text{ max} = 64,2 \text{ ml/kg/mm}$), pendant des courses sur tapis roulant à différents pourcentages de $\dot{V}O_2 \text{ max}$.

(D'après HERMANSEN et STENSVOLD, 1972).

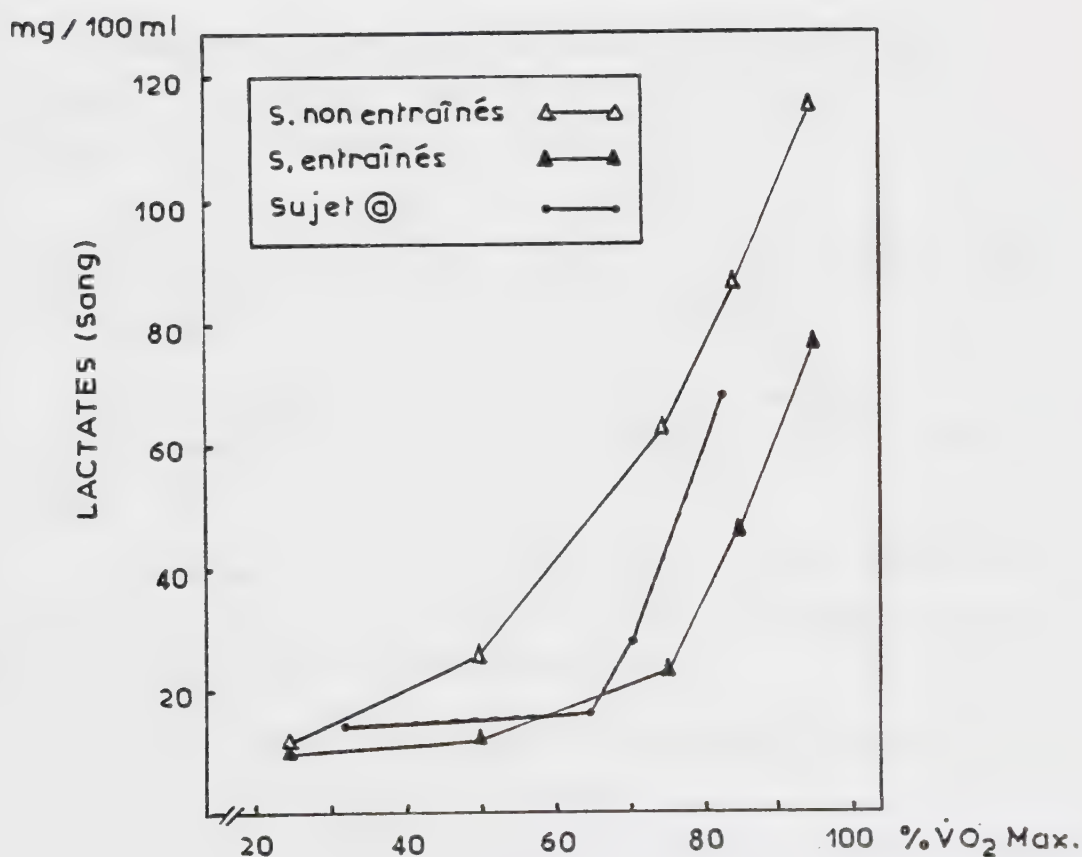


Figure 5 : Concentration sanguine du lactate après 10 minutes d'exercice en fonction de différentes puissances relatives. Valeurs comparatives entre sujets entraînés et non entraînés.

(D'après HERMANSEN et SALTIN 1967).

- le taux musculaire diminue pour une même puissance absolue ou relative après un programme d'entraînement.

- pour un même taux musculaire, le taux sanguin correspondant décroît après la période d'entraînement.

Outre la diminution de production, il semble donc exister une meilleure aptitude à oxyder le lactate produit. Il faut noter que cet entraînement aérobie a permis d'accroître sensiblement les $\dot{V}O_2$ max. (de 3,30 l/min avant à 4,13 l/min après 7 mois). Les processus de réoxydation du lactate sont donc vraisemblablement facilités dans leur intensité et leur délai d'action.

3 - Production maximale d'acide lactique

Une étude de MARGARIA (1964) a été réalisée à propos de la cinétique de la production du lactate pendant l'exercice supramaximal.

Les sujets accomplissent des courses sur tapis roulant à la vitesse de 18 km/h sur différentes pentes variant de 10 à 25 %. Les exercices amènent à l'épuisement en quelques secondes.

Le lactate est dosé dans le sang recueilli lors des premières minutes de la récupération (3e et 5e) et le taux le plus élevé est utilisé pour le calcul de la quantité totale d'acide lactique formé.

L'auteur suppose que le lactate diffuse dans tous les compartiments liquidiens et évalue à 0,8 la fraction d'eau dans le sang et à 0,6 la fraction d'eau de l'organisme tout entier.

Ceci permet le calcul de la quantité de lactate produit au cours de l'exercice en fonction du temps (fig. 6). Les différentes mesures pratiquées pourraient permettre de conclure que :

- l'apparition du métabolisme anaérobie lactique est d'autant plus précoce que l'exercice est intense :

. 15e seconde pour une course amenant à l'épuisement en 30 secondes,

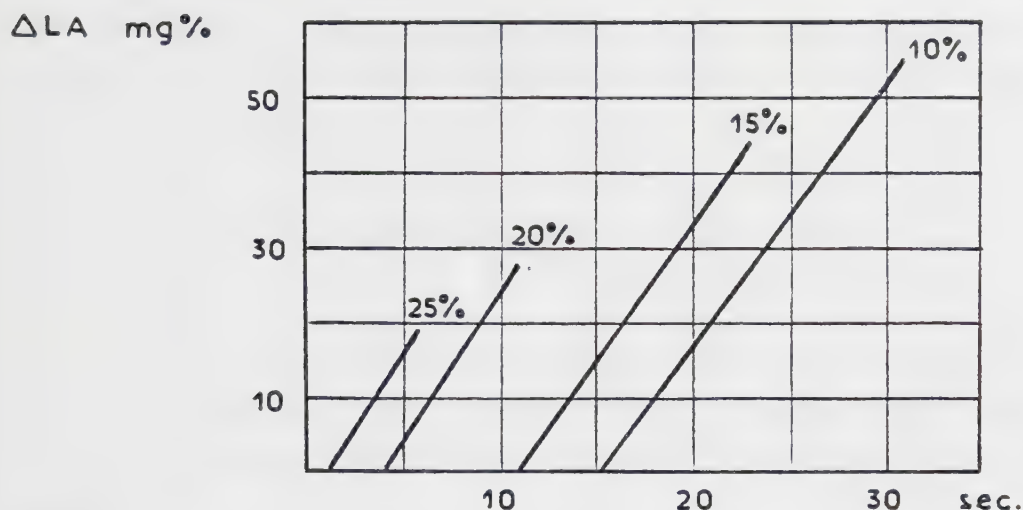


Figure 6 : Accroissement du lactate sanguin en fonction de la durée de l'exercice à propos de 4 courses effectuées sur tapis roulant à vitesse constante et à pente différente (10 - 15 - 20 - 25 %).

(D'après MARGARIA et Coll. 1964)

. 2e seconde pour une course amenant à l'épuisement en 6 secondes.

- la vitesse d'apparition du lactate est constante et maximale (pentes constantes) et atteint une valeur de 36 mg/litre sang x seconde.

- MARGARIA fixe d'autre part la quantité maximale de lactate formé à 1g/kg poids corporel, et l'équivalent énergétique de 1g de lactate à 0,22 Kcal.

Les résultats obtenus par KARLSSON (1971) montrent qu'un exercice supramaximal épuisant en 2 mn 63 secondes amène, chez un individu de 75 kg, la concentration sanguine de lactate à 20 m Moles/litre, (il s'agit du taux maximum jamais obtenu après un exercice musculaire, comparable aux taux atteints par les patineurs de vitesse). Ce taux correspond selon la théorie de MARGARIA à 75 g de lactate produit (1g/kg), et selon sa méthode de calcul (diffusion générale aux liquides de l'organisme) à une quantité totale de 81 g.

Une biopsie musculaire réalisée au même instant que la prise de sang montre qu'il existe 30 m Mole/kg de lactate dans les muscles. Cette quantité doit donc être rajoutée en tout ou partie à la quantité de lactate sanguin.

Il apparaît donc que la production maximale de lactate dépasse largement 1 g/kg. Sa détermination à partir de la concentration sanguine du lactate et du poids corporel est liée à trop d'approximation, surtout lorsqu'elle est appliquée à des sujets aux niveaux d'aptitude et d'entraînement très différents.

4 - Evolution du lactate après l'exercice

La deuxième série d'expérimentation d'HERMANSEN et STENSVOLD (1972) s'attache à étudier le devenir de la concentration sanguine de lactate pendant la phase de récupération d'un exercice développant une puissance supramaximale.

Les sujets accomplissant trois exercices supramaximaux amenant à l'épuisement en 60 secondes environ. Les exercices sont séparés par une période de repos de 4 minutes.

Dès la fin de la 3e phase de course, des prélèvements sanguins sont effectués toutes les 5 minutes et ceci pendant les 30 minutes de la période de récupération. Pour chaque sujet, plusieurs exercices sont pratiqués de façon à étudier la cinétique du lactate lorsque la période de récupération consiste en un repos complet ou un travail à 30, 60, 70 et 80 % de $\dot{V}O_2$ max. (Fig. 7).

Il apparaît que la vitesse de décroissance du lactate est significativement plus élevée lorsque le sujet est en récupération active que lorsqu'il est au repos complet.

La vitesse de décroissance du lactate est aussi fonction de l'intensité de l'exercice pratiqué pendant la récupération. La figure 8 indique la vitesse de disparition du lactate exprimée en mg/100 ml x min en fonction de la puissance de l'exercice de récupération exprimé en pourcentage de la puissance maximale aérobie.

La vitesse maximale de disparition du lactate se situe entre des puissances d'exercice atteignant 60 - 70 % $\dot{V}O_2$ max. Pour des exercices représentant 80 - 90 % de $\dot{V}O_2$ max, la vitesse de disparition du lactate décroît tout en restant nettement supérieure à la vitesse calculée lors de la récupération au repos complet.

Ainsi, un exercice représentant 60 - 80 % de la puissance maximale aérobie d'un sujet bien entraîné semble être le niveau énergétique critique aussi bien pour le début de production intensive que pour la réoxydation maximale

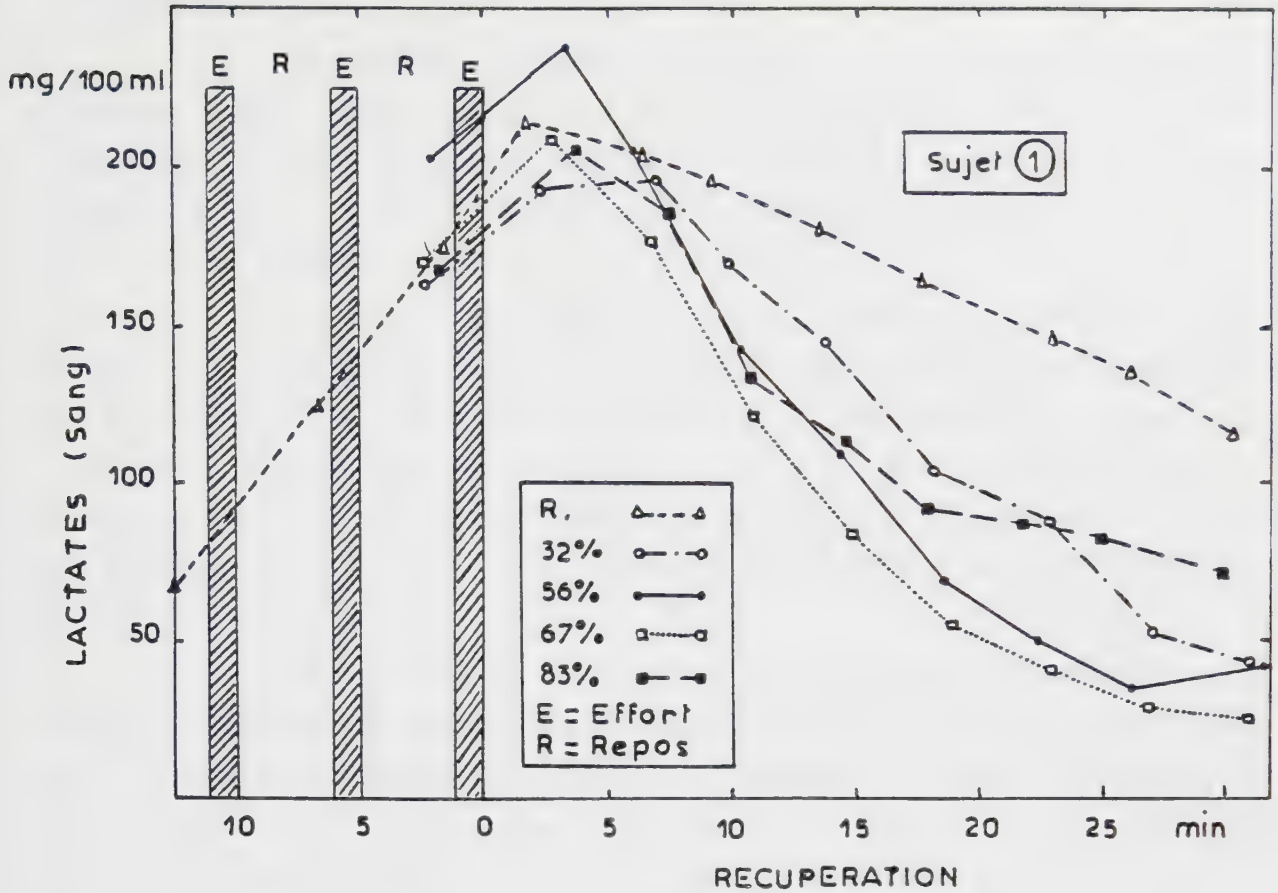


Figure 7 : Concentration sanguine du lactate chez un sujet pendant et après 3 exercices supramaximaux. La période de récupération consiste en un repos complet ou en des courses à $\neq$ % de $\dot{V}O_2$ max.

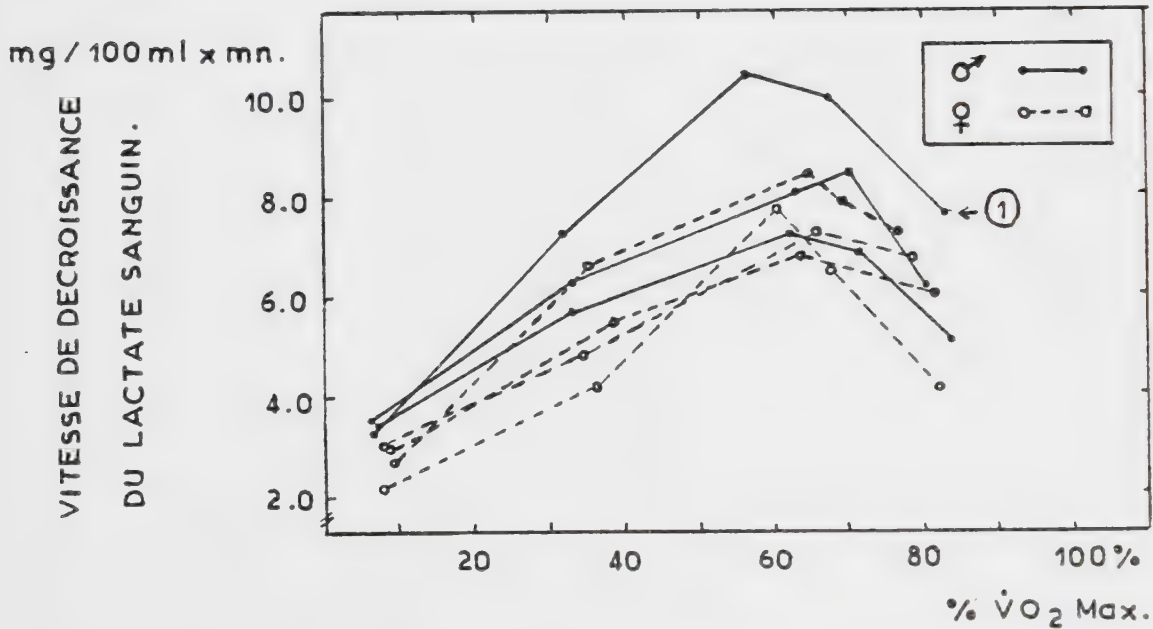


Figure 8 : Vitesse de décroissance du lactate sanguin en fonction de la puissance relative de la récupération.

(D'après HERMANSEN et STENSVOLD, 1972).

du lactate.

Ces résultats complètent les conclusions de ROWELL and coll. (1966) et (1971). Selon ces auteurs, la réoxydation du lactate est due principalement au foie (50 %) pendant la récupération active, muscle en activité et au repos, myocarde ainsi que l'élimination sudorale et urinaire intervenant pour les 50 % restants.

Les calculs réalisés selon un protocole identique à celui de ROWELL (d'après MARGARIA, 1963) montrent pour l'expérimentation d'HERMANSEN que la disparition du lactate diffusible dans les liquides intra et extra-cellulaires, s'effectue à une vitesse de 4 à 4,5 g par minute pendant la récupération active. La part hépatique de la réoxydation du lactate est évaluée par les mêmes calculs à 150 mg par minute soit 3-4 % du taux de réoxydation global.

Ces différences s'expliquent par le fait que l'expérimentation de ROWELL provoque une concentration sanguine de lactate moindre, n'aboutissant pas à la saturation enzymatique du système hépatique qui reste alors primordial. Pour des exercices amenant à des concentrations sanguines élevées (150-200 mg %), les capacités métaboliques du foie sont alors dépassées et l'intervention des muscles en activité devient prépondérante pour permettre la réoxydation du lactate produit.

II - METABOLISME ANAEROBIE ALACTIQUE

1 - Définition et généralités

Nous avons défini le métabolisme anaérobie alactique comme le processus énergétique initial qui permet l'accomplissement d'un effort physique par l'utilisation des réserves musculaires en ATP et les systèmes de recharges "locaux" que constituent l'ADP et la créatine phosphate.

Lors d'un exercice supramaximal, les réserves de phosphagène s'épuisent en quelques secondes. Les travaux de MARGARIA (1964) tentent de fixer les temps maximaux d'utilisation de l'énergie anaérobie alactique à propos d'exercices très intenses sur tapis se déroulant à 18 km/heure sur une pente variant de 10 à 25 %.

Il existerait une relation linéaire entre l'énergie maximale requise et la durée de l'exercice.

La figure 9 illustre ces résultats. D'après les sujets étudiés, il apparaît que l'exercice maximum soutenu (temps inférieur à 1 seconde) représente une puissance réellement fournie de 45 Kcal/kg x heure, alors qu'un exercice de 30 Kcal/kg x heure peut-être soutenu 24 secondes environ.

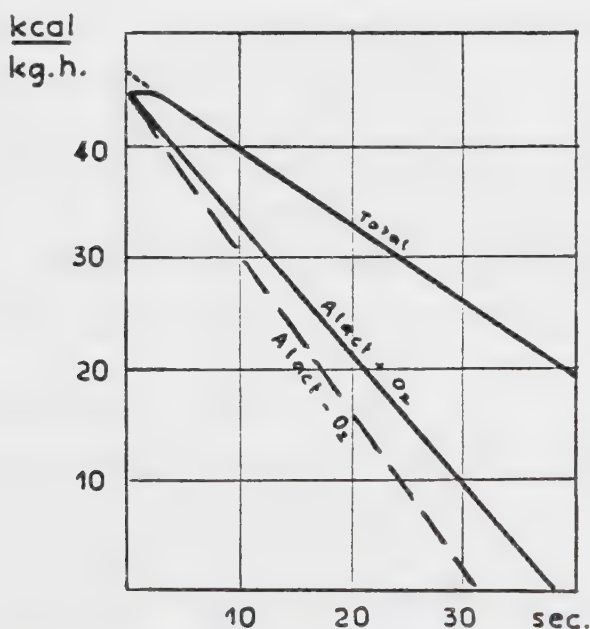


Figure 9 : Temps pendant lequel peut être soutenu un exercice intense d'une puissance donnée (total).
Temps pendant lequel ces exercices pourraient être maintenus avec la seule participation du métabolisme alactique associé ou non au métabolisme aérobie lié aux réserves musculaires d'oxygène (Alact + O₂, Alact - O₂)

(D'après MARGARIA et Coll. 1964)

Le graphe fait apparaître le temps théorique pendant lequel cet exercice pourrait être maintenu avec la seule participation du métabolisme anaérobie alactique. Pour cela, il est nécessaire de déduire l'énergie fournie par la formation d'acide lactique ainsi que l'énergie fournie dès le début de l'exercice par le métabolisme aérobie (réserves de myoglobine). Les 30 Kcal/kg x heure pourraient alors être fournies pendant seulement 10 secondes.

2 - Evolution du phosphagène musculaire pendant l'exercice.

Parallèlement au dosage du lactate, les biopsies musculaires ont été utilisées par KARLSSON et coll. en 1972, pour le dosage des réserves musculaires en ATP et CP pendant les différentes phases d'exercices musculaires et périodes d'entraînement précédemment décrites.

- Les différentes mesures réalisées révèlent que le taux d'ATP décroît proportionnellement à la puissance fournie mais le taux résiduel après un exercice amenant à l'épuisement en plusieurs minutes reste cependant supérieur à 50 % du taux initial.

Ainsi dans la période précédant l'entraînement, il existe
3,8 mMoles/kg muscle frais d'ATP au repos et
2,6 mMoles/kg muscle frais d'ATP après l'exercice maximal.

L'entraînement permet de maintenir au repos et après l'effort, une quantité supérieure d'ATP
4,8 mMoles/kg muscle frais au repos
3,6 mMoles/kg muscle frais après l'exercice maximal.

La créatine phosphate diminue dans des proportions plus importantes lors de l'exercice, mais l'entraînement ne semble pas entraîner d'augmentation de la quantité disponible de CP. Ainsi avant entraînement il existe :

16,9 mMoles/kg muscle frais au repos
3,1 mMoles/kg muscle frais après exercice maximal,
alors au'après la période d'entraînement,
16,8 mMoles/kg muscle frais au repos
4,3 mMoles/kg muscle frais après exercice maximal.

- Le taux de phosphagène musculaire moyen de repos des sujets étudiés par KARLSSON et Coll. s'élève donc après entraînement à 20,6 mMoles/kg de muscle frais.

20 kg de muscle disposent donc de 432 mMoles de phosphagène, soit environ 4,32 Kcal, si l'on suppose qu'un exercice supramaximal de quelques secondes épuise totalement les réserves musculaires.

Ainsi, un exercice de 30 Kcal/kg /heure, soit 0,52 Kcal/seconde pour un individu de 70 kg pourrait être maintenu environ 7,5 secondes (10 secondes selon MARGARIA).

3 - Estimation de la puissance musculaire anaérobie alactique

MARGARIA (1966) a proposé de l'apprécier à partir d'un exercice maximal soutenu pendant 1 à 2 secondes. Il s'agit de mesurer la vitesse maximale atteinte lors de la montée d'un escalier dont les dimensions sont connues, et d'en déduire la valeur de la composante verticale de la vitesse.

Compte tenu de la durée de l'effort, la part anaérobie lactique de cette énergie peut-être considérée comme négligeable, et seules, les réserves de phosphagène sont donc en cause.

Il est cependant peu probable que ce test détermine un épuisement aussi rapide du taux d'ATP et de CP, ce qui lui enlève son caractère de mesure de la capacité alactique maximale.

L'étude expérimentale séparée des métabolismes anaérobies est donc astreinte à des méthodes de mesure indirectes introduisant des nombreuses extrapolations et imprécisions.

La mesure directe de l'énergie aérobie nécessaire pour la restitution de l'état musculaire antérieur à un effort violent peut permettre une approche plus précise de ces deux métabolismes.

III - LA DETTE D'OXYGENE

1 - Définition et généralités

Au terme d'un exercice de puissance quelconque, la consommation d'oxygène demeure à un niveau plus élevé que celui de la consommation d'oxygène de repos et ceci pendant plusieurs minutes.

Cette différence entre la consommation d'oxygène de repos et la consommation d'oxygène après exercice pendant le même temps est définie comme la dette d'oxygène.

Cette dette d'oxygène est censée assurer la récupération du déficit d'oxygène apparu au cours de l'exercice.

Les mesures comparatives du déficit et de la dette d'oxygène montrent que la dette est toujours très supérieure au déficit.

En fait, la destinée de l'oxygène consommé pendant la récupération est multiple :

- reconstitution des stocks d'oxygène (restitution de la saturation de la myoglobine et de la différence artério-veineuse $(a - v) O_2$ initiales : la quantité d'oxygène nécessaire atteint au maximum 1 litre.
- utilisation accrue d'oxygène du fait de l'augmentation de la thermogénèse et du système adrénérergique : quantité d'oxygène estimée à 1 litre.
- consommation d'oxygène par le système respiratoire : 0,5 litre.

Il existe donc 2,5 litres d'oxygène qui n'ont pas de rapport avec le déficit contracté lors de l'exercice.

- La dégradation de 1'ATP et de la CP peut libérer 5 à 7,5 Kcal, donc se substitue à l'apport de 1 à 1,5 litres d'oxygène.

Au total, ces 4 litres d'oxygène peuvent être définis comme la dette alactique (non provoquée par la nécessité de réoxydation de l'acide lactique).

- Le métabolisme de l'acide lactique.

D'après KREBS (1964), 22,4 litres d'oxygène peuvent assurer la transformation d'environ 180 g d'acide lactique. D'autre part, la production de 180 g d'acide lactique à partir du glycogène permettent la libération de 55 Kcal avec utilisation de 11 litres d'oxygène seulement.

Il en résulte que l'organisme doit payer une dette lactique qui s'élève au double du déficit contracté.

2 - Cinétique de la dette en fonction du type d'exercice pratiqué

DI PRAMPERO et Coll. (1972) se sont attachés à différencier la dette d'oxygène faisant suite à un exercice amenant la consommation d'oxygène à un niveau stable élevé de la dette faisant suite à un exercice supramaximal amenant à l'épuisement en 15 à 20 secondes (course sur un tapis se déroulant à 18 km/h avec une pente variant de 10 à 20 %).

- Pour les exercices aérobies, $\dot{V}O_2$ décroît rapidement, dès la fin de l'exercice avec un $t_{1/2} \approx 25$ secondes (temps mis pour que la $\dot{V}O_2$ diminue de moitié).

- Pour les exercices supramaximaux atteignant $\dot{V}O_2$ max en fin d'exercice, $\dot{V}O_2$ reste constante et maximale pendant environ 25 secondes au début de la récupération, puis décroît avec une cinétique comparable à celle de l'exercice aérobie ($t_{1/2} = 27,5$ secondes).

- Pour un exercice supramaximal n'ayant pas atteint $\dot{V}O_2$ max à la fin de l'exercice, le début de la récupération est marquée par un accroissement de $\dot{V}O_2$ pendant 20 - 25 secondes, puis $\dot{V}O_2$ décroît avec un $t_{1/2} = 25$ secondes.

Pour ces trois types d'exercices, la décroissance rapide de $\dot{V}O_2$ ($t_{1/2} = 25$ secondes) se prolonge pendant 3 minutes. Ensuite, la $\dot{V}O_2$ diminue beaucoup plus lentement avec un $t_{1/2} = 15 - 20$ min.

- Dans les premières secondes de la phase de récupération, la fréquence cardiaque et le débit ventilatoire suivent la même cinétique que $\dot{V}O_2$ max, c'est-à-dire : FC et $\dot{V}E$ diminuent immédiatement après l'arrêt de

l'exercice aérobie, mais restent à un niveau constant pendant une vingtaine de secondes après l'arrêt de l'exercice supramaximal.

Les auteurs en arrivent donc aux déductions suivantes :

. La différence entre les dettes des exercices aérobies et supramaximaux se situe exclusivement au niveau des premières secondes de la récupération ; c'est-à-dire, pendant le temps au cours duquel $\dot{V}O_2$ reste constant (td).

. La composante lente de décroissance de $\dot{V}O_2$ représente à la fois le paiement de la dette lactique et la $\dot{V}O_2$ correspondant à l'accroissement du métabolisme basal (hyperthermie) et du travail musculaire cardio-respiratoire.

Extrapolée jusqu'au début de la phase de récupération, la quantité d'oxygène que représente cette composante lente donne la valeur quantitative de la dette lactique (partielle).

. La consommation d'oxygène retrouvée pendant la phase rapide et de laquelle est déduite la dette lactique définie ci-dessus, représente une fonction exponentielle avec $t_{1/2} = 27$ secondes. Ainsi est isolée la dette alactique nette (à laquelle il faut ajouter la $\dot{V}O_2$ correspondant à td pour l'exercice supramaximal).

. Une autre conclusion concerne la cinétique de l'acide lactique. D'après DI PRAMPERO et Coll., lors des exercices supramaximaux, alors que $\dot{V}O_2$ reste constante, du lactate serait produit pendant les premières secondes de la récupération pour permettre de compléter le paiement de la dette alactique. La quantité de lactate produit serait d'autant plus importante que td et la durée de l'exercice sont courts. Ainsi apparaît la notion de paiement de la dette anaérobie alactique:

. Par les processus anaérobies lactiques (en partie) si ceux-ci n'ont pas atteint leur niveau maximum pendant l'exercice (exercice court).

. Par les processus aérobies exclusivement lorsque le pH musculaire empêche tout accroissement du métabolisme anaérobie lactique.

CONCLUSION :

Le métabolisme anaérobie peut-être étudié suivant plusieurs possibilités.

- 1 - Dosage du lactate sanguin et musculaire qui rend compte de l'existence du processus lactique et de sa tendance à la production ou à la réoxydation par l'évolution de la cinétique.
- 2 - Dosage du phosphagène musculaire qui indique l'aptitude du muscle à préserver ses réserves énergétiques de base.
- 3 - Mesure de la puissance anaérobie lactique en fonction de la vitesse verticale maximale atteinte dans un temps inférieur à deux secondes (intérêt des mesures longitudinales).
- 4 - La mesure de la dette d'oxygène qui permet d'exprimer la part relative des processus lactiques et alactiques.

C - INTERET DE L'ETUDE SIMULTANEE DES PROCESSUS AEROBIES ET ANAEROBIES

L'exploration des processus aérobie et anaérobie de façon séparée ne rend pas compte de la réalité de pratique de tous les sports.

S'il est vrai que l'influence des processus aérobie est primordiale lors des compétitions de longue durée et que celle des processus anaérobie est primordiale lors des compétitions de courte durée (inférieur à 2 minutes), il faut souligner que chaque processus est susceptible d'être mis en jeu de façon simultanée et variable, lors de diverses compétitions. C'est le cas des sports collectifs qui font intervenir des exercices d'intensité et de durée très variable, sur un temps global égal ou supérieur à 1 heure.

Pour une meilleure approche physiologique de ces sports, l'action des divers systèmes énergétiques doit être considérée comparativement lors d'exercices intermittents faisant intervenir des intensités et durées d'exercice et de récupération variables.

1 - Influence de la durée des intervalles

Une expérimentation de CHRISTENSEN et Coll. (1960) est résumée dans le tableau 2.

Il apparaît que la consommation maximale d'oxygène est atteinte à la fin de chaque course maintenue pendant 10 secondes et suivie de 5 secondes de repos. A la fin de la série (10 s - 5 s), le lactate sanguin s'élève à 44 mg/100 ml, valeur peu importante si l'on tient compte du déficit concédé à chaque répétition de course ($\dot{V}O_2$ moyenne de chaque répétition : 5,1 l/mn, besoin énergétique équivalent en oxygène de chaque répétition ; 7,3 l/mn).

Il semble que le déficit énergétique puisse être comblé par les réserves de phosphagène et l'oxygène de la myoglobine, ces réserves étant rapidement reconstituées pendant la récupération.

PERIODES TRAVAIL - REPOS EN S.	DISTANCE EN M.	CONSOMMATION D'OXYGENE LITRES / MN.			LACTATE SANGUIN MG / 100
		Travail		Repos	
		Valeur max	Valeur moy,		
5-5	5000		4,3	4,5	23
5-10	3300		3,4	3,0	16
10-5	6670	5,6	5,1	4,9	44
10-10	5000	4,7	4,4	3,8	20
15-10	6000	5,3	5,0	4,5	51
15-15	5000	5,3	4,6	3,8	21
15-30	3300	3,9	3,6	2,8	16

Tableau 2 : Résultats recueillis sur un sujet au cours d'un travail intermittent de 30 mn consistant en une course sur tapis roulant à la vitesse de 20 km/h. Lorsqu'on lui imposait un travail continu, le sujet pouvait courir 4 mn et couvrir une distance de 1300 m ; dans ces conditions la consommation d'oxygène était de 5,6 l/mn, et la concentration sanguine de lactate de 150 mg/100 ml.

(D'après CHRISTENSEN et Coll. 1960)

TYPE D'EXERCICE	CONSUMMATION D'OXYGENE litres / h litres / mn		LACTATE SANGUIN MG/100
Continu: 1080 kgm / mn. 2160 kgm / mn. *	146	2,44 4,60	12 150
Intermittent: 2160 kgm / mn.			
Exercice Repos			
1/2 mn 1/2 mn	154	2,90	20
1 mn 1 mn	152	2,93	45
2 mn 2 mn	160	4,40	95
3 mn 3 mn	163	4,60	120

* ne peut être exécuté que pendant 9 minutes.

Tableau 3 : Résultats concernant un sujet fournissant un travail de 64800 kgm sur bicyclette ergométrique en 1 heure, en observant différents régimes d'exercices.

(D'après ÅSTRAND et coll. 1960)

Ainsi, lors de ce type d'entraînement par intervalles courts-courts, les processus anaérobies lactiques ne sont pas sollicités, alors que le métabolisme aérobie peut atteindre un niveau submaximal ou maximal pendant un temps global plus long que lors d'un travail continu exécuté à la même puissance.

Dans le même temps I. ASTRAND et Coll. (1960) expérimentent un type d'entraînement par intervalles plus longs (tableau 3), faisant intervenir des phases d'exercice et de repos de durée identique.

Le métabolisme anaérobie lactique est sollicité de façon intense à partir des intervalles 2 mn - 2 mn qui représentent ainsi le niveau de sollicitation maximum du système aérobie. Pour les intervalles de plus courte durée (30 s - 30 s, 1 mn - 1 mn), l'entraînement apparaît peu efficace sur les deux métabolismes.

KARLSSON et Coll. (1967) prouvent d'une façon encore différente l'influence des intervalles sur la sollicitation des processus énergétiques (figure 10).

Le temps d'exercice ne varie pas (70 s), la distance parcourue est constante (400 m), le temps de récupération est choisi à 60 s et 20 s.

Le rythme (70 s - 60 s) ne permet d'atteindre que 80 % de $\dot{V}O_2$ max, le lactate s'élevant alors à 40 mg %.

Dans le rythme (70 s - 20 s) apparaît la sollicitation quasi maximale (98 %) du processus aérobie et l'acide lactique s'élève en fin d'exercice à 115 mg %.

2 - Influence de la puissance fournie

Une variation très faible de la puissance relative retentit de façon significative sur la sollicitation des processus énergétiques.

Ainsi, KARLSSON et Coll. (1967) font pratiquer des courses à répétition avec des périodes d'exercice et de repos courtes (20 s - 10 s), à deux vitesses différentes (22 km/h et 22,75 km/h).

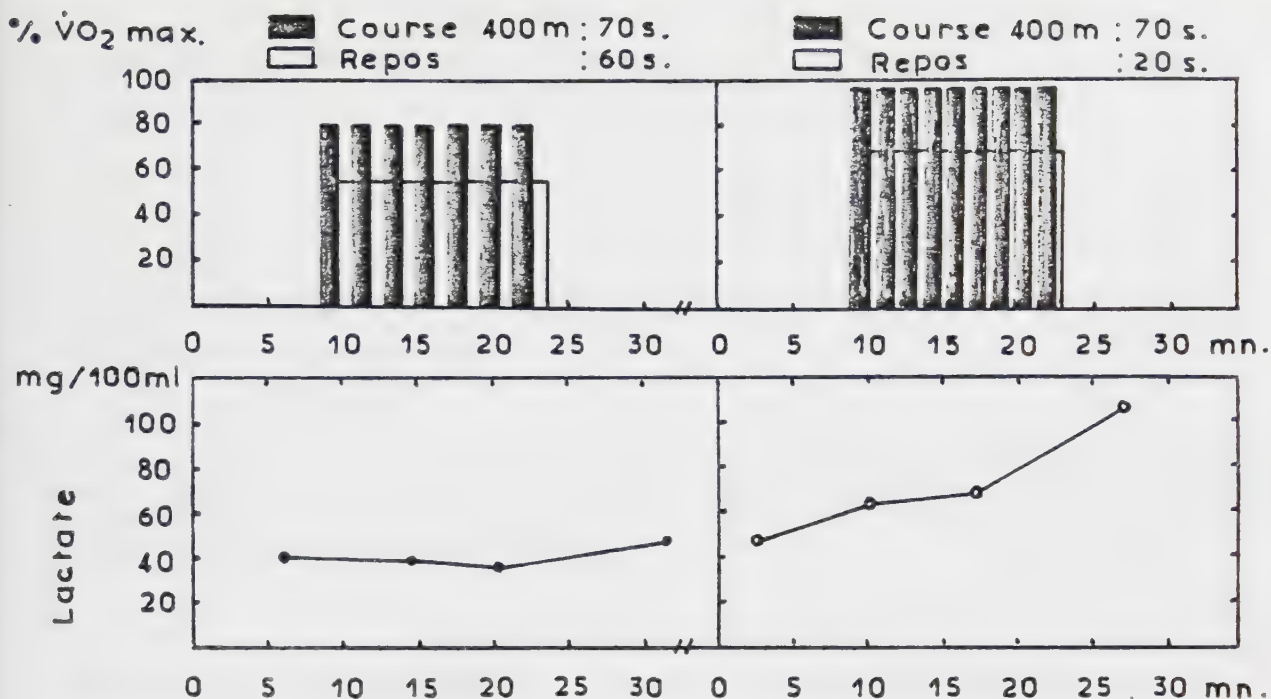


Figure 10 : Analyse des effets de la variation de la durée des périodes de repos sur la consommation d'oxygène et sur la concentration sanguine de lactate lors d'une course sur tapis roulant, la vitesse et la durée des exercices étant constantes.

(D'après KARLSSON et coll. 1967)

A la 30e minute de la répétition de course à 22 km/h, $\dot{V}O_2$ moyenne atteint 90 % de $\dot{V}O_2$ max lors de l'exercice et 70 % lors de la récupération. Le lactate sanguin s'élève à 54 mg %.

A la 15e minute de la série de courses à 22,75 km/h $\dot{V}O_2$ moyenne atteint 100 % $\dot{V}O_2$ max pendant l'exercice et 85 % pendant la récupération, le lactate s'élevant alors à 110 mg % (cette valeur est déjà atteinte à la 5e minute de répétition).

3 - Conclusions pratiques

Il est possible de solliciter de façon préférentielle ou globale les divers processus énergétiques en intervenant sur la durée de la fréquence exercice-repos et sur la puissance de chaque exercice.

Une compétition faisant intervenir un sport collectif comme le hand-ball, se déroule sur un mode d'intervalle et détermine des sollicitations énergétiques dépendant du rythme et de l'intensité imposés par les deux équipes en présence.

Il est donc impossible de prévoir le profil énergétique d'une rencontre, surtout si le potentiel technique des équipes permet l'application de divers systèmes de jeu.

L'organisation de l'entraînement doit donc mettre en jeu plusieurs situations différentes de travail intermittent préparant ainsi les joueurs aux conditions variables de compétitions.

METHODOLOGIE

A - L'EQUIPE

I - Les sujets

Le CASE Hand-Ball évolue actuellement au plus haut niveau des équipes régionales (ligue du lyonnais). Le potentiel collectif s'élève à une vingtaine de joueurs. Au total 17 joueurs ont été concernés par les différentes mesures pratiquées au laboratoire, (mesure de $\dot{V}O_2$ max et dette maximale d'oxygène), entre septembre 76 et avril 77. L'impossibilité de répéter les mesures sur quelques uns d'entre eux (départ pendant la saison, blessures, etc...), ramène à 12 le nombre de mesures fiables de $\dot{V}O_2$ max. Le collectif global de l'équipe a été suivi lors des entraînements et des rencontres ce qui a permis de réaliser des expérimentations sur le terrain.

II - Les entraînements

L'équipe suit un entraînement bihebdomadaire.

1) L'ENTRAÎNEMENT DU MARDI est d'abord consacré à un entraînement physique général pendant 1 heure. Cette première phase est suivie par une séance intensive de tirs de 30 à 45 mn puis de jeu libre sans consigne technique stricte pendant une quinzaine de minutes.

La séance d'entraînement physique est constituée par :

- . Une période préliminaire de course en souplesse réalisée à l'extérieur du gymnase, sur une distance de 2500 m.

- . Une période d'exercices en vagues se déroulant sur la longueur du terrain (40 m) réalisée à partir d'exercices sollicitant de façon primordiale les membres inférieurs en flexion extension, abduction, rotation, appui monopodal... chaque vague représente un exercice de 7 à 15 secondes suivi d'une récupération de 5 à 10 secondes.

Des séries de 4 à 5 vagues sont entrecoupées par des exercices statiques à visée articulaire et musculaire au niveau des membres supérieurs et du tronc.

- . Une dernière période consiste en un travail pénible et soutenu comportant :

- un exercice exécuté "sur appui" (position de défense du joueur de Hand-Ball, jambes fléchies à 90 - 120° sur les cuisses, buste vertical, bras levés) ou l'ensemble des joueurs suit les déplacements d'un coéqui-

pier placé en miroir. L'exercice est soutenu pendant 30 secondes et terminé par un sprint de 20 m, le tout répété 3 fois avec un repos de 15 à 20 secondes entre les exercices.

- un travail de saut à la corde de 30 secondes de durée, comportant pendant 10 secondes un travail à rythme lent, puis pendant 20 secondes, un travail à fréquence très rapide avec élévation maximale des genoux. Une séance comporte cinq répétitions séparées par des intervalles de 30 secondes de repos.

Cette séance d'entraînement nous a permis de réaliser des enregistrements de fréquence cardiaque et des dosages de lactates sanguins.

2) LA SEANCE DU JEUDI est réservée à l'entraînement technique et tactique.

Une première partie est réservée pendant 30 mn à des jeux avec ballon représentant des exercices d'intensité élevée (échange de passes sur un circuit, répétitions de sprints suivis de tirs au but). Puis pendant 60 à 90 mn, est réalisé un travail des combinaisons tactiques représentant un jeu collectif entrecoupé de périodes de repos relativement longues.

III - Les rencontres

Au cours des rencontres ont été réalisées des séances d'analyse chronométrique (décomposition des intervalles de jeu et de repos en fonction de la durée et de l'intensité), et des dosages de lactate. L'enregistrement de la fréquence cardiaque n'a pu être réalisé pendant des rencontres officielles. Des séances d'entraînement comportant des rencontres à rythme et intensité de compétition ont été utilisées pour ces enregistrements.

B - LES EPREUVES DE LABORATOIRE

I - Matériel employé

- Tous les exercices sont réalisés sur une bicyclette ergométrique de type MONARK.

- Les gaz expirés sont recueillis dans des sacs de DOUGLAS par l'intermédiaire d'un robinet chronométré à 3 sorties. Tous les conduits utilisés sont de forte section (35 mm de diamètre) et exercent une résistance négligeable au passage des gaz expirés.

- Pendant les exercices, la fréquence cardiaque est mesurée sur le tracé électrocardiographique.

- L'analyse des gaz et la mesure des volumes.

Le dispositif d'analyse comprend :

. un analyseur magnéto dynamique d'O₂ (SERVOMEX type OA 137)

. un analyseur de CO₂ (SCHLUMBERGER) placé en série et à travers lequel une pompe envoie 1,05 litre de gaz par minute.

Les étalonnages sont réalisés avant chaque séance d'analyse.

Les lectures sont faites après 1 minute de passage du gaz, ce qui correspond à la latence de réponse de chaque appareil.

La mesure des volumes gazeux est réalisée au moyen d'un spiromètre de TISSOT bien équilibré.

Pression atmosphérique et température des gaz sont relevées lors de la mesure des volumes pour permettre les conversions de volume ATPS en STPD.

II - Réalisation pratique des épreuves

1) MESURE DE $\dot{V}O_2$ MAX

a) Les exercices préliminaires

- L'échauffement

Avant chaque épreuve maximale, les sujets suivent un échauffement musculaire de 6 minutes. Comme chaque joueur a fait l'objet d'au moins 2 mesures de $\dot{V}O_2$ max, il a donc été possible de prévoir pour chacun d'eux, une puissance d'échauffement amenant la fréquence cardiaque entre 130 et 150 / minute. Les puissances d'échauffement choisies ont varié entre 800 et 1000 kgm/mn. Cet exercice préliminaire permet d'autre part au sujet de s'habituer au port du masque et de s'adapter à la fréquence de pédalage choisie pour tous les exercices : 70 cycles par minute. L'expérience nous a montré que cette fréquence favorisait moins l'apparition de douleurs musculaires que les fréquences inférieures.

- Choix des puissances

La période d'échauffement est utilisée pour la détermination indirecte de la consommation maximale d'oxygène par la méthode d'ÅSTRAND et RYHMING. La puissance maximale aérobie ainsi déterminée correspond à la puissance nécessaire à atteindre pendant l'exercice maximal.

b) L'épreuve maximale

Dans une première série d'expérimentations, l'exercice maximal comprenait une seule puissance à maintenir si possible pendant 6 minutes (méthode rectangulaire). Il nous est apparu que ce type d'épreuve sous estimait la consommation d'oxygène (QR inférieur à 1). Ceci est vraisemblablement dû en partie à la mauvaise adaptation des joueurs à l'exercice maximal sur bicyclette. Les exercices ne pouvaient être maintenus pendant un temps supérieur à 4 - 5 minutes.

Une deuxième série d'expérimentations a donc été nécessaire, avec utilisation cette fois ci de la méthode triangulaire.

Après la période d'échauffement, chaque palier représentant une puissance croissante, est maintenu 1 minute 30, avec prélèvement des gaz expirés pendant les 30 dernières secondes du palier.

La répartition des puissances est déterminée de telle sorte que le palier maximal prévisible (puissance maximale aérobie indirecte majorée de 100 à 200 kgm/mn) soit atteint entre 6 mn et 7 mn30 s d'exercice.

Ce type d'épreuve est accepté plus facilement par les sujets. Les valeurs obtenues sont toutes supérieures ou égales aux valeurs déterminées par la méthode rectangulaire, pour des douleurs musculaires moindres.

Il faut cependant souligner que 1 à 2 mois se sont écoulés entre les 2 séries de mesure, pendant lesquels les joueurs ont suivi régulièrement un entraînement intense, l'adaptation à l'ambiance et au matériel du laboratoire étant certainement meilleure au cours de la seconde série de mesures.

Nous avons donc eu recours à un contrôle de l'épreuve triangulaire par une nouvelle méthode rectangulaire à propos d'un sujet bien adapté à l'exercice sur bicyclette.

Après 6 mn d'échauffement à 850 kgm/mn, la méthode triangulaire a permis d'atteindre en 5 paliers la puissance de 1785 kgm/mn, correspondant à une $\dot{V}O_2$ mesurée à 4,52 l/mn (QR = 1,03 - lactate 86 mg %).

Pour la méthode rectangulaire, un palier intermédiaire de 1 minute a suivi l'échauffement et a précédé l'exercice réalisé pendant 6 minutes à la puissance de 1785 kgm/mn. A la 4ème minute de l'exercice maximal, $\dot{V}O_2$ a été mesuré à 4,48 l/mn, à la 6ème minute à 4,56 l/mn (QR = 1,02 - Lactate = 126 mg %).

Ces résultats peuvent permettre de conclure que l'épreuve triangulaire par paliers de 1 minute 30 amène à une consommation d'oxygène équivalente à celle obtenue par la méthode rectangulaire à puissance maximale égale.

2) MESURE DE LA DETTE MAXIMALE D'OXYGENE

a) Echauffement

Les mesures de la dette d'oxygène ont été réalisées en fin d'expérimentation. Il a donc été possible de choisir une puissance d'échauffement équivalente à 50 % de la puissance maximale aérobie mesurée directement, à maintenir pendant 6 minutes.

b) Exercice supra maximal

La puissance choisie pour tous les sujets représente 125 % de la puissance maximale aérobie, l'exercice étant maintenu jusqu'à l'épuisement à un rythme de pédalage de 70 cycles/minute. La durée d'exercice pour les sujets étudiés a varié entre 1 mn 38 s et 2 mn 30 secondes.

Un prélèvement de gaz expirés réalisé pendant les 20 à 30 dernières secondes de l'exercice, indique la consommation d'oxygène atteinte.

c) La récupération

Dès l'arrêt de l'exercice, les gaz expirés sont recueillis en continu dans des sacs de Douglas avec les durées de recueil suivantes : 30 s, 1 mn, 1 mn 30 s, 2 mn, 4 mn, 6 mn, 8 mn, 10 mn.

Pour des raisons liées au temps d'expérimentation et de mesure, la période de récupération n'a jamais atteint le temps théorique de 60 minutes. La récupération la plus courte ayant duré 37 minutes, les mesures de la consommation d'oxygène pendant cette période ont donc été ramenées à 37 minutes pour les 7 sujets étudiés.

La récupération consistait en un repos total en position assise.

Quatre expérimentations ont donné lieu à un contrôle du lactate sanguin à la 5ème, 10ème, 15ème, 20ème et 30ème minute de la récupération.

d) La consommation d'oxygène de repos avant l'exercice n'a pas été mesurée directement, les sujets n'étant jamais en condition basale stricte.

Nous avons utilisé les tables de BOOTHBY et coll (1936) permettant la détermination du métabolisme de base en fonction de l'âge et de la surface corporelle, exprimée en litre d'oxygène par minute (1 litre d'oxygène correspond à une dépense énergétique de 4,82 Kcal au repos).

La différence entre la consommation d'oxygène totale de la période de récupération et la consommation basale d'oxygène dans le même temps permet de définir la dette d'oxygène réelle. Par convention (voir KARLSSON et coll. 1967), nous avons pris comme valeur de la dette effective la moitié de la dette mesurée.

3) DOSAGE DU LACTATE SANGUIN

a) Conditions de prélèvement

Le dosage du lactate sanguin a été pratiqué à la suite de divers types d'exercices : mesure de $\dot{V}O_2$ max et de dette maximale d'oxygène, entraînement physique et rencontres.

Compte-tenu de la relative gêne qu'aurait pu provoquer une piqure au bout du doigt chez nos joueurs, et de la difficulté d'obtenir à tout coup un afflux de sang suffisant après scarification du lobe de l'oreille, nous avons choisi de pratiquer les prélèvements au niveau des veines périphériques de l'avant-bras.

Tous les dosages de lactate sanguin ont donc été réalisés sur sang veineux et non sur sang artérialisé.

Le prélèvement a été effectué trois minutes après la fin de l'exercice lors des mesures de $\dot{V}O_2$ max, à partir de la 5ème minute lors de la mesure de la dette d'oxygène et entre 5 et 10 minutes après les séances d'entraînement et les rencontres.

La déprotéinisation est réalisée immédiatement avec l'acide perchlorique 0,6 N ou l'acide métaphosphorique à 5 %.

Après centrifugation, le surnageant obtenu avec l'acide perchlorique est conservé à 4°C et dosé dans un délai d'une semaine, le surnageant obtenu avec l'acide métaphosphorique pouvant être conservé plusieurs semaines à - 18°C.

b) Méthode de dosage

Nous avons utilisé la méthode enzymatique décrite par H.U. BERGMEYER (1965) qui utilise la réaction :



En présence de tampon glycocolle (pH9) et d'hydrazine qui se combine avec le pyruvate, la réaction évolue dans le sens (1). L'intensité d'absorption d'un spectre d'ultra violet (spectrophotomètre UNICAM 1800) permet d'évaluer la quantité de lactate consommé.

- Toutes les manipulations sont exécutées après l'élaboration d'une

courbe étalon effectuée à partir d'échantillons de 5, 10, 20 et 25 μg de lactate.

- Les mesures sont effectuées sur tube doublé, à 2 dilutions (apport de 100 et 200 μl de surnageant de déprotéïnisation), et en tenant compte de l'effet d'une dose de charge en acide lactique de 5 μg .

Une dilution initiale au 1/15 lors de la protéïnisation a été rendue nécessaire pour que les mesures s'effectuent dans la zone linéaire de la courbe d'étalonnage.

C - LES EXPERIMENTATIONS SUR LE TERRAIN

1) TELEMETRIE

a) Matériel utilisé

Nous avons utilisé le système télémétrique TM 450 mis au point par la société IEE en collaboration avec des médecins de l'Institut National des Sports, Docteurs CHIGNON, DUMAS, DIBIE.

Le système comprend :

- un émetteur de faibles dimensions, d'un poids de 210 grammes. Deux électrodes exploratrices et une électrode neutre placées sur le thorax, sont reliées à l'émetteur fixé dans le dos du sujet.

- un récepteur permettant d'obtenir :

. un signal décodé pour enregistrement graphique sur électrocardiographe ou visualisation sur oscilloscope.

. un signal non décodé pour enregistrement magnétique. Cet enregistrement peut être décodé par le récepteur dans un deuxième temps, ce qui permet le stockage des informations recueillies sur le terrain et leur interprétation différée.

La transmission de l'électrocardiogramme d'un sujet effectuant un exercice dans des conditions réelles est possible jusqu'à une distance de 1 km.

Le système émetteur récepteur est autonome (piles).

b) Conditions d'expérimentation

- L'enregistrement direct de la fréquence cardiaque a été utilisé lors des entraînements et des rencontres.

- Le système de télémétrie est relié à un électrocardiographe qui permet la surveillance de la qualité de la réception et le recueil régulier de l'ECG toutes les 30 secondes.

Le signal est enregistré continuellement sur une bande magnétique. L'emploi d'un magnétophone stéréophonique permet d'enregistrer parallèlement un commentaire et de déchiffrer ultérieurement les fréquences cardiaques non recueillies par l'enregistrement direct.

- Les résultats peuvent donc être donnés sous forme d'un graphe représentant la fréquence cardiaque en fonction du temps et du type d'exercice pratiqué.

- Connaissant la fréquence cardiaque maximale du sujet étudié, il est possible de déterminer les différents pourcentages de $\dot{V}O_2$ max atteints pendant le travail et de déterminer ainsi un profil énergétique de cet exercice.

2) DETERMINATION DE LA PUISSANCE MUSCULAIRE INSTANTANEE

a) Fondement théorique : MARGARIA et coll. (1966)

Les auteurs présentent un mode d'exercice permettant d'atteindre dans un temps très court une dépense énergétique intense. Il s'agit de mesurer la composante verticale de la vitesse maximale atteinte lors de l'escalade d'un plan incliné de pente déterminée. L'obtention d'une vitesse optimale et constante est nécessaire : dans ces conditions, l'énergie dépensée n'est plus utilisée pour l'accélération mais seulement pour l'élévation du centre de gravité du sujet.

b) Conditions expérimentales

- Détermination de la pente : les auteurs montrent que l'escalade de marches de 35 cm de haut permet d'atteindre la vitesse optimale pour des sujets de morphologie moyenne. La force requise et le temps de contraction musculaire représentent un facteur de diminution de la vitesse maximale pour des marches de hauteur supérieure, alors que la fréquence de saut élevée représente le facteur limitant pour des hauteurs inférieures.

- Délai d'obtention de la vitesse optimale. Les sujets sont chronométrés sur un escalier composé de marche de 17,5 cm de haut et 32,5 cm de profondeur, qu'ils gravissent deux par deux. Le système de chronométrage est composé de cellules photoélectriques reliées à un chronomètre électronique précis au 1/100^e de seconde. Les temps relevés lors de la montée indiquent que la vitesse optimale est atteinte en moyenne à la 8^{ème} marche (4^{ème} saut) si le départ est donné sans élan, ou à la 4^{ème} marche (2^{ème} saut) si le sujet fait précéder l'escalade d'une course d'élan de 2 mètres (fig. 11).

Dans les deux cas la vitesse demeure maximale jusqu'à la 12^{ème} marche.

c) Conditions expérimentales de notre étude

Les dimensions de l'escalier utilisé correspondent exactement à celles préconisées par MARGARIA (17,5 cm de hauteur, 32,5 cm de profondeur).

Le système de chronométrage est composé de contacts électriques sensibles situés au seuil de la 8ème et de la 12ème marche, reliés à un chronomètre électronique précis au $1/1000^{\circ}$ sec. Ce dispositif permet au sujet de choisir le mode de départ, avec ou sans élan, la vitesse étant considérée maximale à partir de la 8ème marche (fig. 11).

Connaissant le poids des sujets, il est possible de déterminer la puissance externe fournie (globale ou par unité de poids) et l'énergie endogène requise

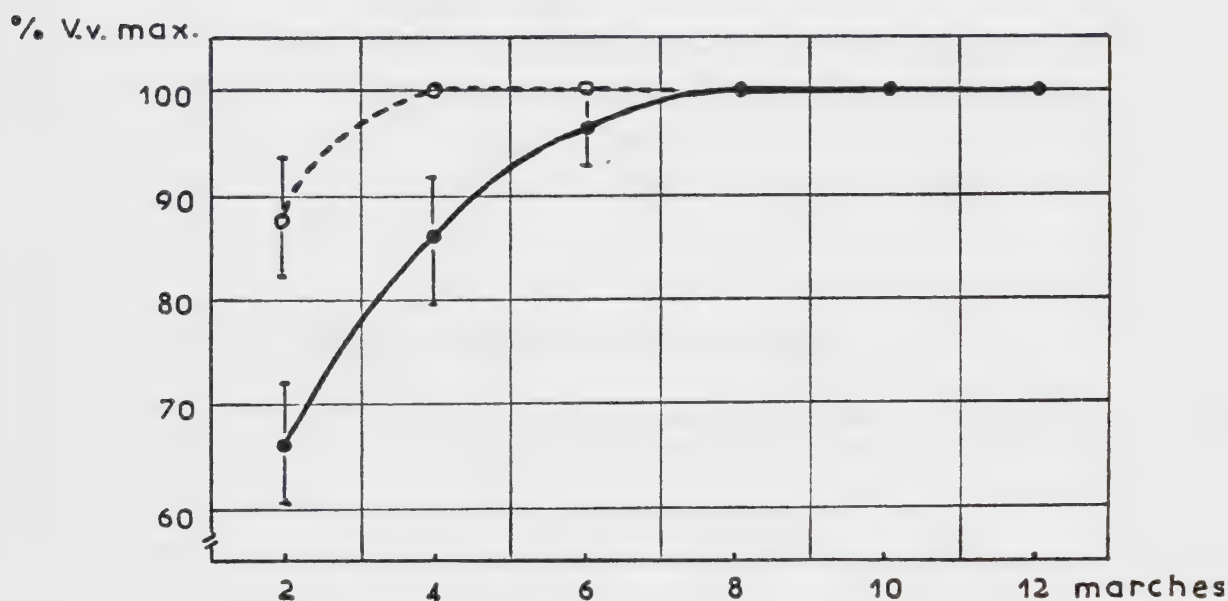


Figure 11

Composante verticale de la vitesse en pourcentage de la vitesse maximale atteinte en fonction du nombre de marches franchies depuis le départ

(ligne continue : départ sans élan

ligne discontinue : départ précédé d'une course horizontale de 2 mètres.) (d'après MARGARIA et coll., 1966).

LES RESULTATS

I - LES SUJETS

Nos résultats concernent :

- 12 sujets pour la mesure de $\dot{V}O_2$ max
âge moyen : 22,7 ans (18-35)
poids moyen : 75 kg (66,2 - 96)
taille moyenne : 180,5 cm (175-190)
- 7 sujets pour la mesure de la dette maximale d'oxygène
âge moyen : 22,7 ans (18-29)
poids moyen : 75 kg (66,2-96)
taille moyenne : 180 cm (175-190)
- 27 sujets pour la mesure de la puissance maximale instantanée
(10 sujets communs aux mesure de $\dot{V}O_2$ max et de la dette et,
17 sujets appartenant soit aux réserves du collectif de
l'équipe des séniors, soit à l'équipe des cadets).
âges extrêmes : 15 et 35 ans
poids extrêmes : 54,7 et 96 kg.

II - EPREUVES PRATIQUES AU LABORATOIRE

1 - Mesure de la consommation maximale d'oxygène (tableau 4)

- Valeurs de $\dot{V}O_2$ max obtenues.
La moyenne des 12 mesures pratiquées atteint 3,98 litres/mn
(3,63 - 4,52) ou 53,3 ml/mn/kg (41,4 - 62,8).
- Puissance maximale aérobie,
moyenne : 1633 kgm/mn
valeurs extrêmes : 1300 kgm/mn pour une $\dot{V}O_2$ de 3,88 l/mn
1890 kgm/mn pour une $\dot{V}O_2$ de 4,32 l/mn
- Débit ventilatoire maximal moyen : 116,2 l STPD/mn (99,6-141,6)

N°	SUJET	AGE	TAILLE	POIDS	P max kgm/min	$\dot{V}O_2$ max l STPD/min	$\dot{V}O_2$ max ml/min/kg	$\dot{V}E$ max l STPD/min	QR	FC max.	AL mg/100ml
1	G.R.	25	190	96	1785	4,52	47,1	102,7	1,03	188	86
2	C.D.	20	183	68,4	1300	3,88	56,7	99,6	1,09	196	77
3	P.JM.	29	178	77	1710	4,18	54,3	116,4	1,05	180	125
4	B.JC.	20	182	73	1575	3,84	52,6	104	1,02	182	115
5	B.Y.	22	177	66,2	1575	4,16	62,8	136	1,21	194	112
6	T.M.	23	182	72	1680	4,03	56,0	118,5	1,20	178	113
7	S.D.	18	176	70	1470	3,63	51,8	113,4	1,06	197	80
8	B.M.	18	180	73	1680	3,89	53,3	102,5	1,05	186	86
9	B.D.	22	178	70	1575	3,72	53,1	111,1	1,12	188	65
10	F.J.	35	185	90	1680	3,73	41,4	141,6	1,19	178	58
11	F.P.	20	175	70,6	1890	4,32	61,2	113,7	1,15	188	123
12	R.P.	20	180	77,8	1680	3,89	50	135	1,15	193	135
m.		22,7	180,5	75	1633	3,98	53,3	116,2	1,11	188	98

Tableau 4 : Consommation maximale d'oxygène et paramètres associés, mesurés chez les joueurs de hand-ball.

- Quotient respiratoire moyen : 1,11 (1,02 - 1,21)
- Fréquence cardiaque maximale moyenne : 188
valeurs extrêmes : 178 (23 et 35 ans)
196 (20 ans)
- Lactate sanguin dosé sur sang veineux prélevé à la 3ème
minute de récupération
valeur moyenne : 98 mg % (58 - 135)

2 - Mesure de la dette maximale effective d'oxygène (tableau 5)

N°	SUJET	POIDS	Durée de l'exercice	% $\dot{V}O_2$ max atteint	DETTE O ₂ EFFECTIVE (L)	DETTE O ₂ EFF. (ml/kg)	A.L. 5'mn	A.L. 10'mn	A.L. 15'mn	A.L. 20'mn	A.L. 30'mn mg/100 ml
1	G.R.	96	2mn23	93	5,83	60,7	117	126	93	73	54
3	P.J.M.	77	2mn6	88	6,82	88,6	—	—	—	—	—
5	B.Y.	66	2mn30	100	6,80	103	115,5	134	118	100	76,5
6	T.M.	72	2mn5	92	7,76	108	139,5	145,5	127,5	114	90
8	B.M.	73	2mn5	100	4,93	67,5	117	103,5	90	72	58,5
9	B.D.	70	1mn38	96	6,66	95,1	—	—	—	—	—
11	F.P.	70,6	1mn52	100	5,47	77,5	—	—	—	—	—

Tableau 5 : Dette maximale d'oxygène et cinétique du lactate sanguin après un exercice représentant 125 % de la puissance maximale aérobie, mené jusqu'à l'épuisement.

Les résultats des 7 mesures pratiquées expriment les valeurs de la dette effective d'oxygène qui représente la moitié de la dette réelle mesurée.

Les mesures sont effectuées pendant les 37 minutes de récupération d'un exercice représentant 125 % de la puissance maximale aérobie, maintenu jusqu'à épuisement (fig. 12).

- Dette effective moyenne : 6,23 l d'O₂ (4,93 - 7,76)
85,8 ml/kg (67,5 - 108)
- Durée moyenne de l'exercice : 2 mn 6 sec. (1mn 38 - 2 mn 30)
- Pourcentage de $\dot{V}O_2$ max atteint à la fin de l'exercice
(mesuré dans les 30 dernières secondes de l'exercice)
moyenne : 95,6 % (88 - 100)
- Cinétique du lactate sanguin pendant la période de récupération (4 sujets - fig. 13)
 - . Valeurs maximales atteintes,
extrêmes 117 et 145,5 mg %
 - . Le taux maximal du sujet B.M. (n° 8) est atteint à la 5ème minute ; pour les 3 autres sujets le lactate maximum est retrouvé sur le prélèvement de la 10ème minute.
- Relation dette effective - lactate sanguin (fig. 14)

D'après nos résultats, il apparaît que le taux de lactate atteint à la 10ème minute de la récupération est d'autant plus important que la dette effective est élevée.

3 - Mesure de la puissance maximale instantanée (tableau 6)

- La mesure a été pratiquée sur 27 joueurs
- L'épreuve consiste en la mesure du temps mis pour franchir 4 marches représentant une dénivellation de 70 cm (précision des temps 1/1000e sec.). Les résultats concernent la vitesse ascensionnelle et sont exprimés en mètre/seconde.

Connaissant le poids du sujet, il est possible de déterminer la quantité d'énergie fournie pendant l'exercice. Pour cela, le rendement

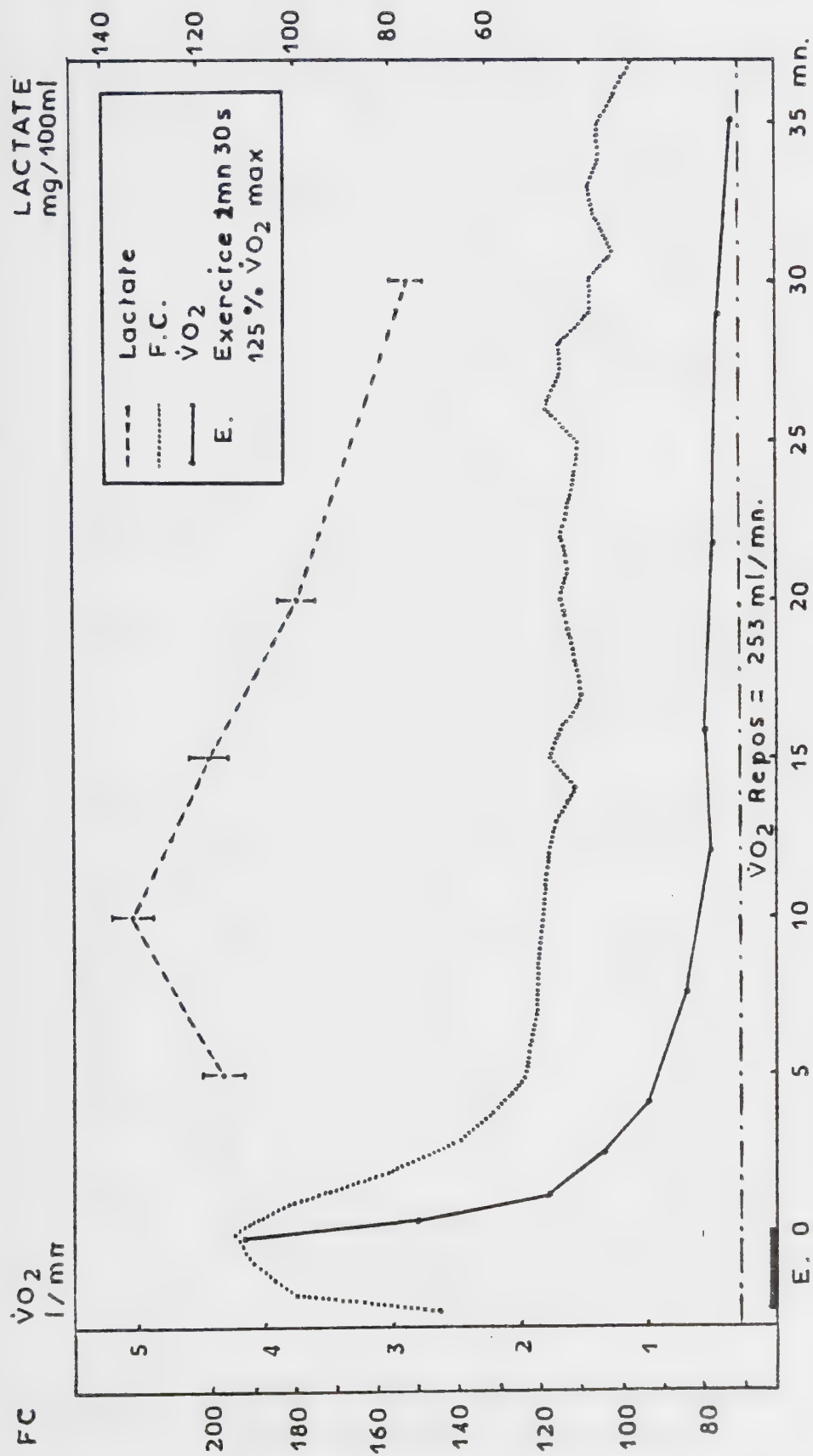


Figure 12 : Cinétique de $\dot{V}O_2$, de la concentration sanguine du lactate et de la fréquence cardiaque pendant la récupération d'un exercice maintenu 2 mn 30 sec. représentant 125 % de la puissance maximale aérobie (sujet B.Y. n° 5).

ΔL mg/100 ml

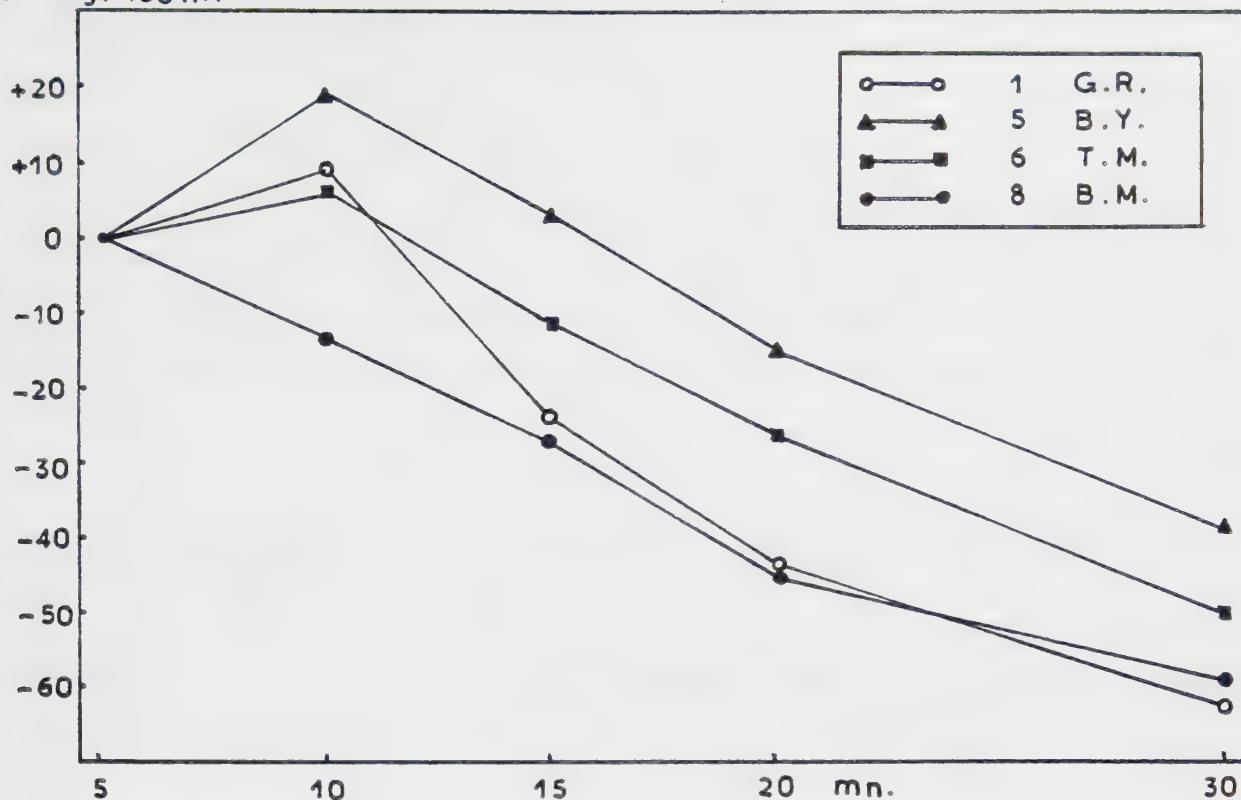


Figure 13 : Evolution de la concentration sanguine du lactate sanguin (ΔL) en fonction du temps de récupération, à partir de la valeur initiale mesurée sur le premier prélèvement (5ème minute).

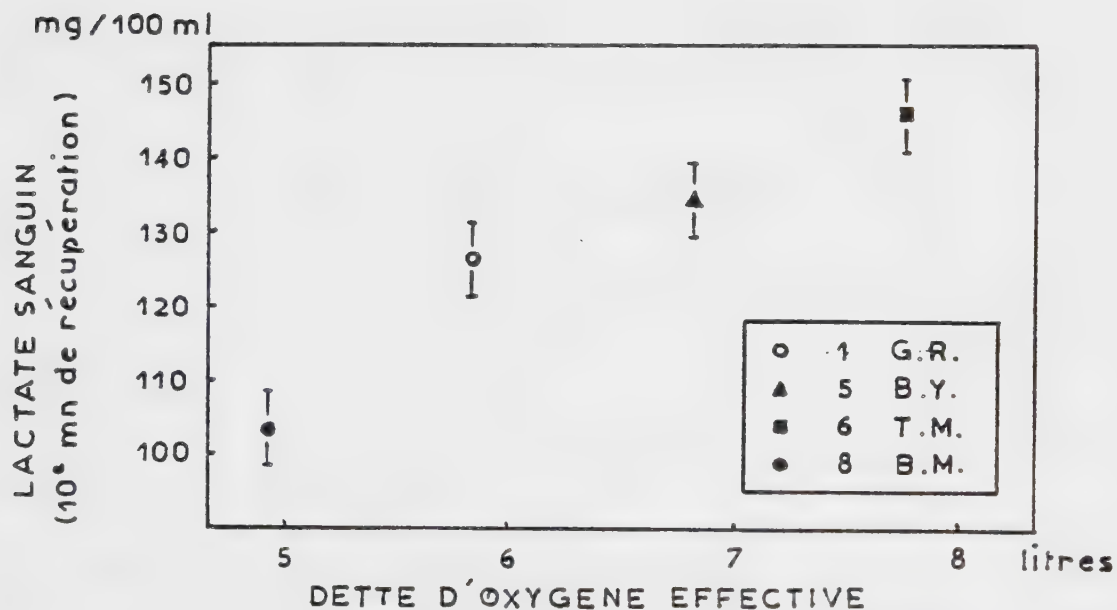


Figure 14 : Relation entre le taux de lactate sanguin (10ème minute) et la dette effective d'oxygène mesurée.

SUJET	1	2	3	4	5	6	7	10	11	12
V _v (m/s)	1,63	1,37	1,91	1,65	1,92	1,92	1,59	1,67	1,73	1,71
P. Max. Inst. (Kcal/mn)	89,9	55,5	86,7	72	71,7	81,7	64,3	84,9	69,2	76,4

V_v = vitesse verticale maximale

Tableau 6 : *Puissance maximale instantanée mesurée avec la technique de MARGARIA (1966).*

musculaire est estimé à 25 % (d'après MARGARIA 1966). Le résultat est exprimé en Kcal/mn.

- . Vitesse verticale maximale moyenne :
1,71 m/s (1,37 - 1,92)
- . Puissance maximale instantanée moyenne :
75,2 Kcal/mn (55,5 - 89,9)

- Cette mesure a également été pratiquée sur des sujets entraînés à différentes disciplines (n = 15). Les résultats obtenus n'indiquent pas de différence significative pour les populations étudiées (fig. 15 b).

III - MESURE PRATIQUES SUR LE TERRAIN

1 - Mesure des intervalles exercices-repos lors des rencontres

de hand-ball.

Trois rencontres ont donné lieu à une analyse chronométrique des intervalles exercices-repos.

Un commentaire indiquant le type d'évolution du joueur est enregistré sur une bande magnétique chronométrée.

Nous avons choisi 4 possibilités d'évolution du joueur : repos, déplacement latéral (D.L.), course lente (C.L.), course rapide (C.R.), (fig. 16).

- Le joueur P.J.M. (n° 3) a été chronométré lors de 2 rencontres. Il occupe le poste d'avant-centre.

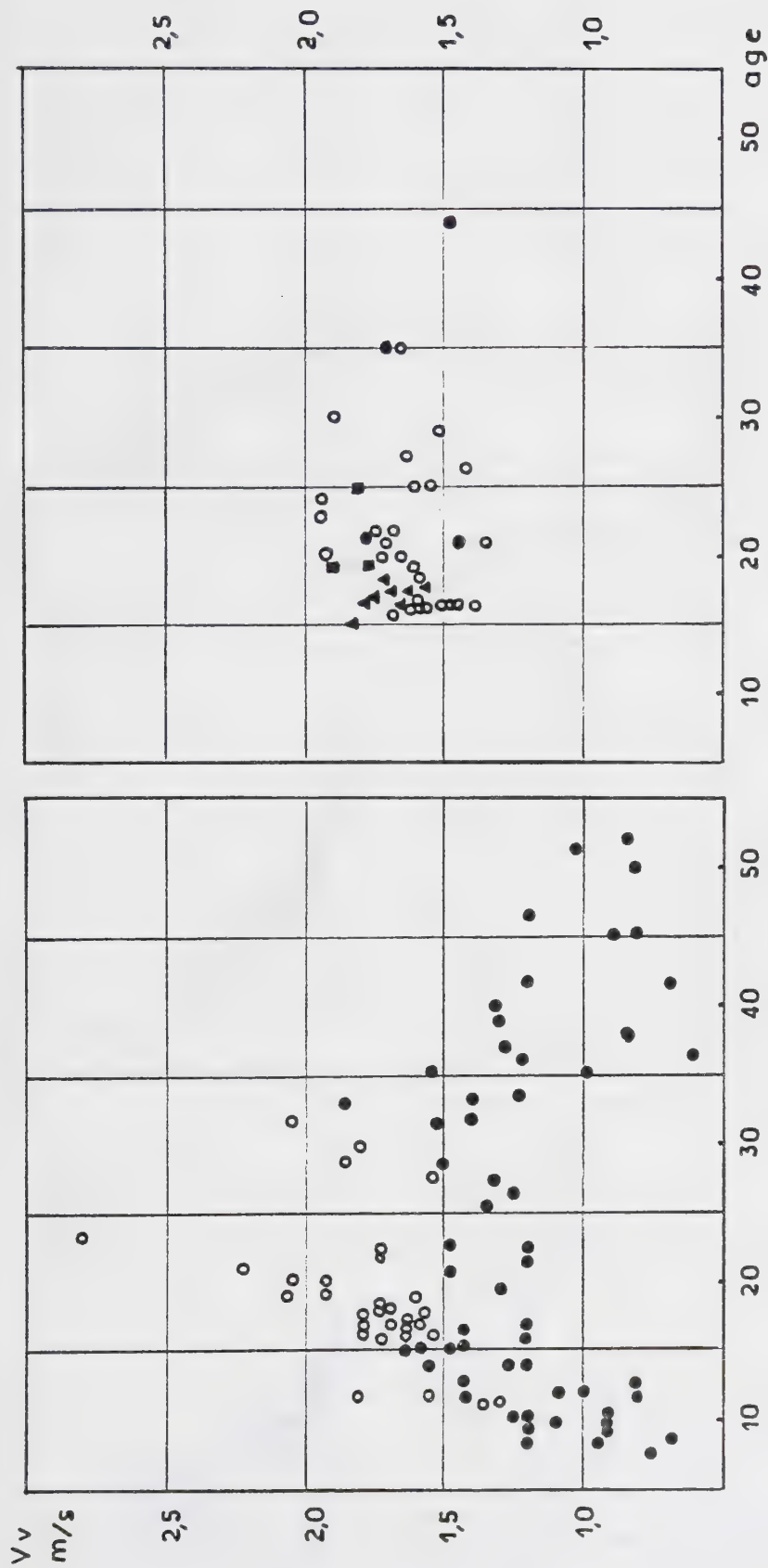


Figure 15 :

Mesure de la puissance maximale instantanée

a) Résultats de MARGARIA 1966

○ sujets entraînés

● sujets non entraînés

b) Nos résultats

○ joueurs de hand-ball (n = 27)

▲ lanceurs (n = 8)

■ coureur à pieds (sprint) (n = 3)

● sujets entraînés sans spécialité particulière (n=4)

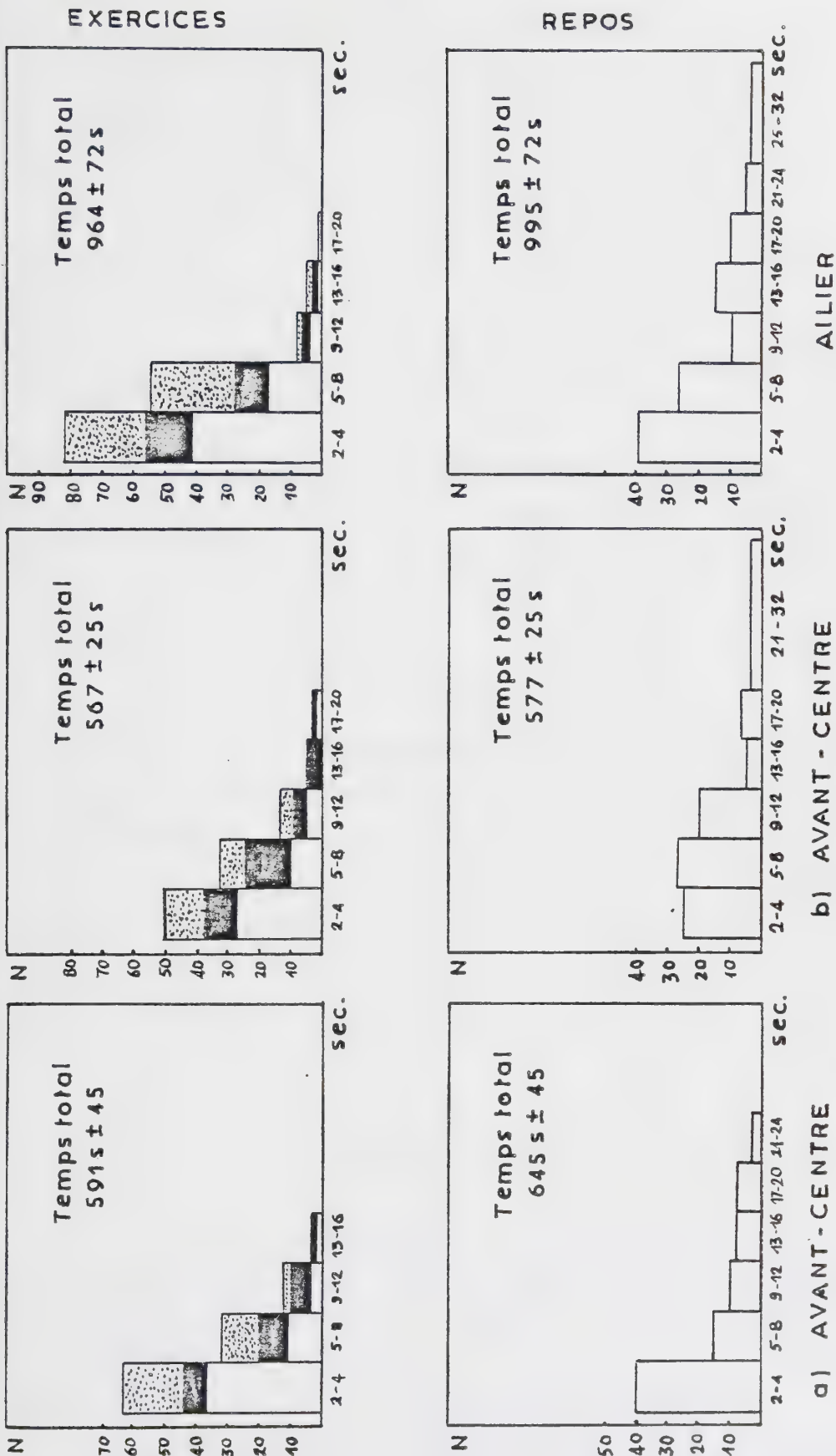


Figure 16 : Répartition de la durée des périodes d'exercices et de repos lors de 3 rencontres officielles. Les périodes d'exercices sont réparties en 3 situations.

. Première mesure. Temps global : 20 minutes

repos.....	645 secondes	$\pm 8 \%$
exercices.....	591 secondes	

L'erreur de la mesure est évaluée par la différence entre le temps d'enregistrement et le temps retrouvé en faisant la somme des différents intervalles mesurés.

Les périodes d'exercices sont représentées par :

D.L. : 268 s.

C.L. : 180 s.

C.R. : 143 s.

La répartition des intervalles d'exercices et de repos est indiquée dans la figure 16.

. Deuxième mesure. Temps global : 19 minutes

repos.....	577 secondes	$\pm 5 \%$
exercices.....	567 secondes	

D.L. : 194 s.

C.L. : 245 s.

C.R. : 128 s.

- Une troisième rencontre a permis d'analyser les joueurs évoluant à l'aile droite (temps global pour 2 joueurs se remplaçant régulièrement : 32 minutes).

repos.....	995 secondes	$\pm 7,5 \%$
exercices.....	964 secondes	

D.L. : 536 s.

C.L. : 138 s.

C.R. : 290 s.

2 - Enregistrement télémétrique de la fréquence cardiaque

Les fréquences cardiaques relevées à l'aide du télémètre permettent d'évaluer les différents pourcentages de $\dot{V}O_2$ max atteints pendant les exercices (utilisation du normagramme d'ÅSTRAND et RYHMING à partir de $\dot{V}O_2$ max et FC max).

a) entraînements (figure 17)

. 3 séances d'entraînement physique ont été étudiées.

% $\dot{V}O_2$ max. FC.

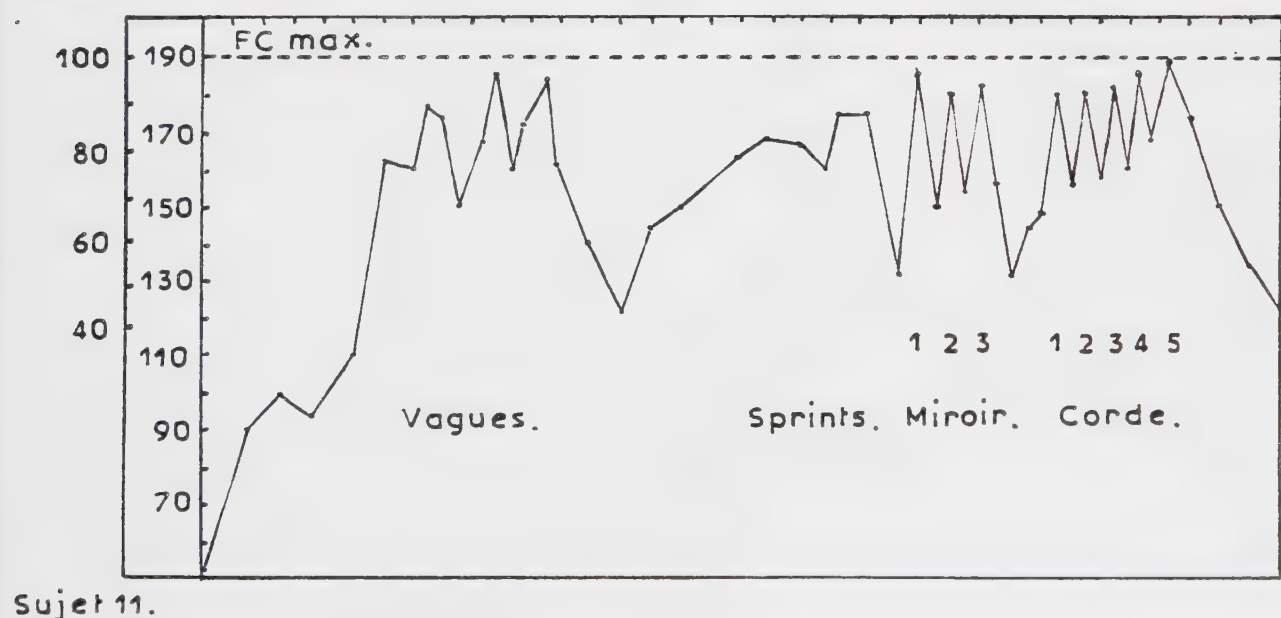
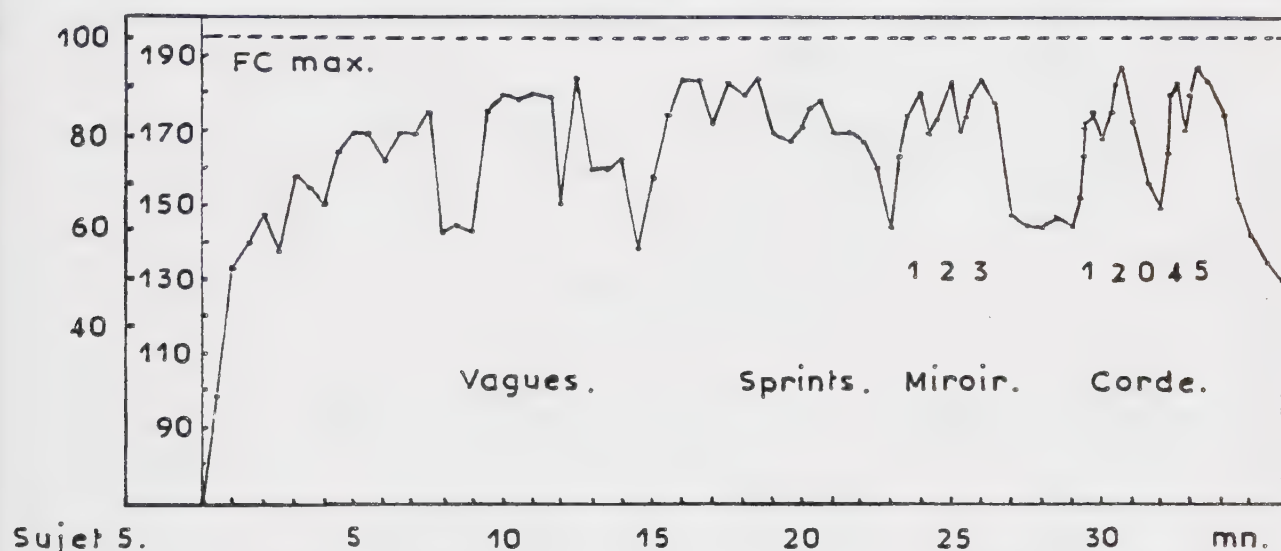
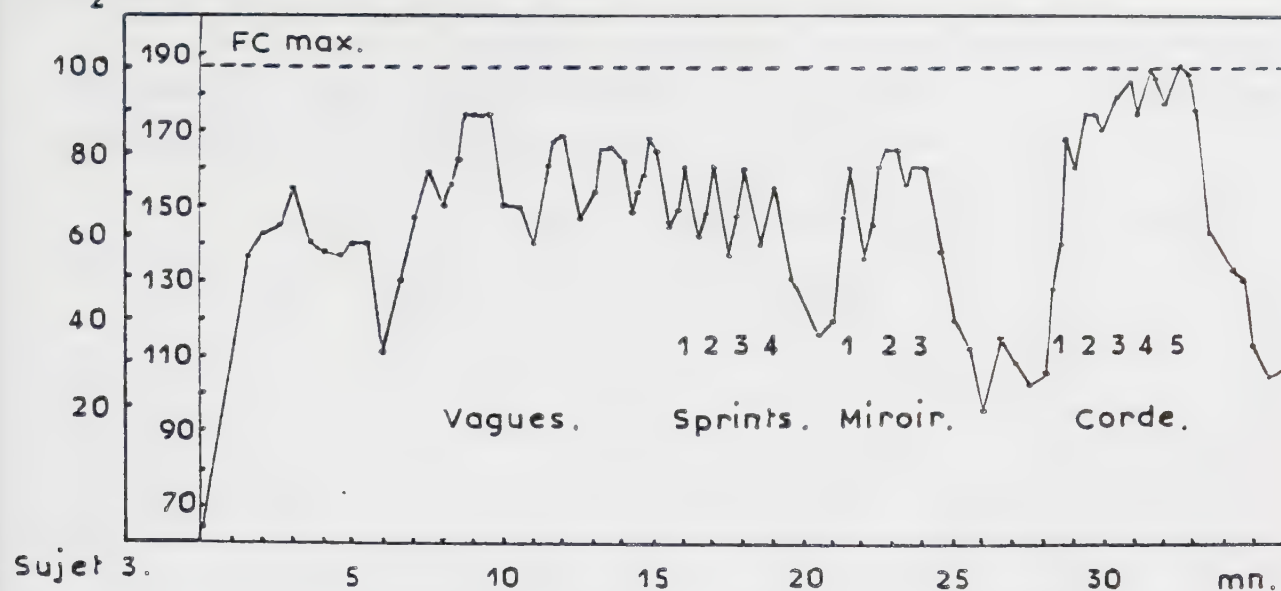


Figure 17 : Fréquence cardiaque et dépense énergétique exprimées en % $\dot{V}O_2$ max mesurées au cours de trois séances d'entraînement physique similaires.

. Il s'agit de séances similaires faisant intervenir des exercices de vagues entrecoupés d'exercices de musculation, des répétitions de sprint (30 m), les exercices du miroir et de la corde.

- Sujet P. JM (n° 3) - FC max : 188 - $\dot{V}O_2$ max 54,3 ml/kg/mn

<u>F.C.</u>	<u>% $\dot{V}O_2$ max</u>	<u>Durée</u>
126	45 %	6 mn 30
132	50 %	1 mn 30
136	55 %	4 mn
143	60 %	5 mn 30
154	70 %	2 mn
160	75 %	3 mn
165	80 %	4 mn
170	85 %	1 mn
173	85-90 %	2 mn
185	90-100 %	3 mn

FC moyenne : 150
% $\dot{V}O_2$ max moyen : 66 %

- Sujet B.Y. (n°5) - FC max : 194 - $\dot{V}O_2$ max 62,8 ml/kg/mn

<u>F.C.</u>	<u>% $\dot{V}O_2$ max</u>	<u>Durée</u>
136	55 %	2 mn
144	60 %	3 mn
150	65 %	5 mn 30
156	70 %	2 mn 30
168	80 %	5 mn
175	85 %	4 mn 30
180	90 %	6 mn
186	95 %	2 mn 30

FC moyenne : 162
% $\dot{V}O_2$ max moyen : 76 %

- Sujet F.P. (n°11)- FC max : 188 - $\dot{V}O_2$ max : 61,2 ml/kg/mn

<u>F.C.</u>	<u>% $\dot{V}O_2$ max</u>	<u>Durée</u>
131	50 %	1 mn 30
142	60 %	6 mn 30
160	75 %	6 mn
165	80 %	4 mn
170	85 %	1 mn
176	90 %	2 mn
185	95-100 %	6 mn

FC moyenne : 162
% $\dot{V}O_2$ max moyen : 77 %

- Le lactate sanguin a été dosé à la suite de séances de ce type sur six joueurs.

valeur moyenne obtenue : 104 mg % (63-135)

b) rencontres (figure 18)

Deux rencontres disputées pendant des séances d'entraînement ont fait l'objet d'enregistrement de la FC. Si l'intensité était semblable à celle de compétition, les durées ont cependant été différentes.

- Première rencontre : joueur P. JM (n°3) FC max : 188

$\dot{V}O_2$ max : 54,3 ml/mn/kg

la rencontre s'est disputée en 2 mi-temps de 20 mn avec repos de 8 mn.

<u>F.C.</u>	<u>% $\dot{V}O_2$ max</u>	<u>Durée</u>
148	65 %	5 mn
160	75 %	8 mn 30
170	85 %	21 mn 30
176	90 %	3 mn 30
185	95-100 %	1 mn

FC moyenne : 168
% $\dot{V}O_2$ max moyen : 81 %

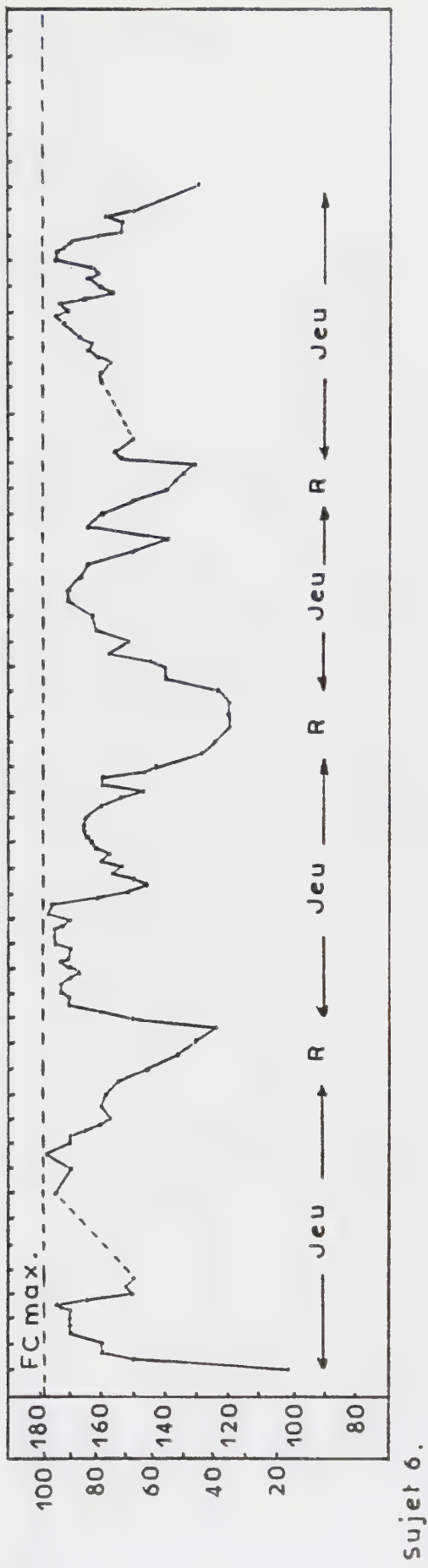
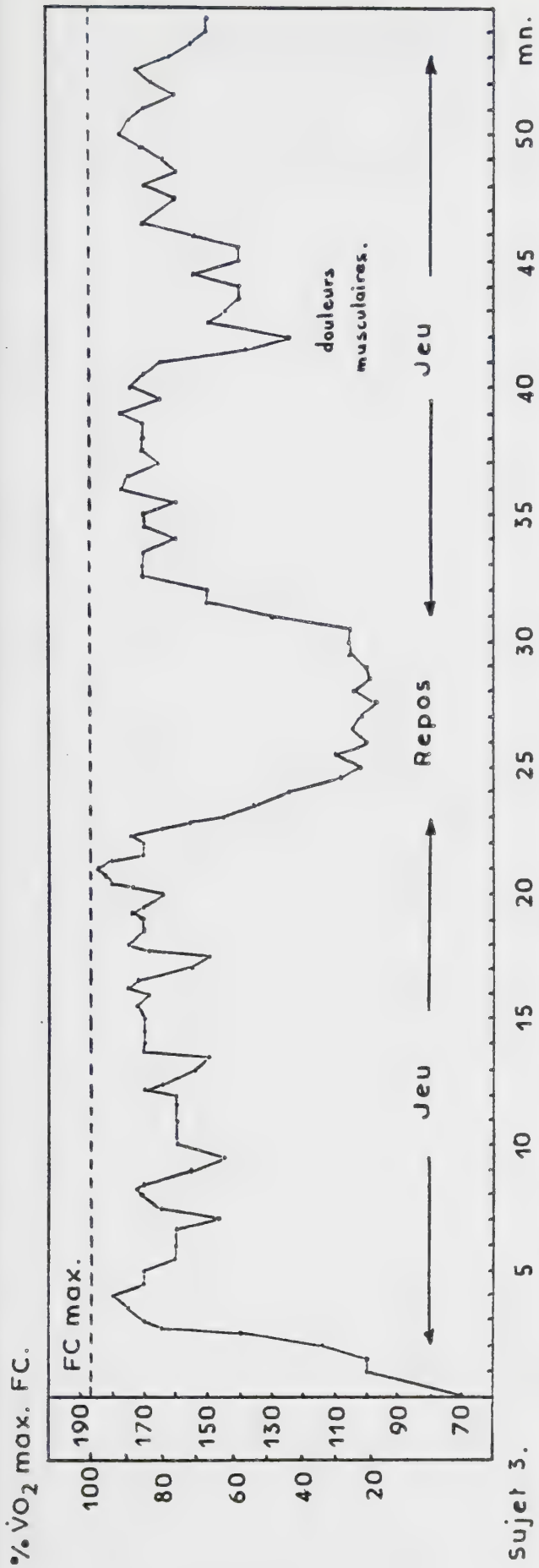


Figure 18 : Fréquence cardiaque et dépense énergétique exprimée en % de $\dot{V}O_2 \text{ max}$ mesurées au cours de deux rencontres amicales.

- Deuxième rencontre : joueur T.M. (n° 6) FC max : 178

$\dot{V}O_2$ max : 56 ml/kg/mn

<u>F.C.</u>	<u>% $\dot{V}O_2$ max</u>	<u>Durée</u>
140	55 %	3 mn
145	60 %	2 mn
148	65 %	1 mn
153	70 %	4 mn
157	75 %	4 mn
162	80 %	6 mn
166	85 %	6 mn
171	90 %	6 mn 30 s
175	95 %	2 mn
177	95-100 %	1 mn 30 s

FC moyenne : 162
 % $\dot{V}O_2$ max moyen : 79 %

- Le lactate sanguin a été dosé à la suite de rencontres officielles sur 4 joueurs.

Valeur moyenne obtenue : 42,5 mg % (36 - 49,5).

DISCUSSION DES RESULTATS

CRITIQUE DES METHODES UTILISEES

1) Mesure de $\dot{V}O_2$ max

a) Choix de la méthode

Il est possible de réaliser cette mesure en utilisant deux méthodes :

- Méthode rectangulaire (ÅSTRAND 1952)
- Méthode triangulaire (BALKE et coll. 1954, MITCHELL et coll. 1958)

La mauvaise adaptation de nos joueurs à l'exercice sur bicyclette a nécessité le choix d'une méthode triangulaire par paliers de courte durée (1 mn 30 s). La puissance maximale aérobie est ainsi atteinte en 4 paliers en moyenne, le premier palier se situant à environ 75 % de la puissance maximale aérobie déterminée indirectement avec la méthode d'ÅSTRAND-RYHMING.

Une épreuve rectangulaire de contrôle effectuée sur un sujet a permis de montrer que l'exercice par paliers amenait à une $\dot{V}O_2$ max équivalente à celle obtenue par un exercice rectangulaire de 6 minutes maintenu à la même puissance maximale.

- Exercice par palier (4,52 l/mn)
- Exercice rectangulaire (4,56 l/mn).

b) Critères de validité

Le problème se pose de savoir si la dernière mesure de $\dot{V}O_2$ correspond bien au $\dot{V}O_2$ max de l'individu. Nous pouvons nous référer aux différents critères définis par FLANDROIS (1969).

- Plafonnement de $\dot{V}O_2$: Dans la majorité des cas, $\dot{V}O_2$ mesuré au dernier palier était supérieur à $\dot{V}O_2$ mesuré lors de l'avant-dernier. Les rapports $P/\dot{V}O_2$ ne sont par ailleurs guère différents : 1510 kgm/mn pour 3,59/STPD/mn à l'avant-dernier palier contre 1633 kgm/mn pour 3,98 l/mn.

Aucun plafonnement de $\dot{V}O_2$ n'a donc été mesuré, ni même un infléchissement de la courbe $P/\dot{V}O_2$ qui témoigne de la proximité de ce plafonnement.

- Mesure du quotient respiratoire. Le Q.R. moyen des sujets était de 1,11 ; cette valeur est proche de 1,15 habituellement retenue comme critère d'atteinte de la puissance maximale aérobie.

- Concentration sanguine du lactate ; la valeur moyenne de 98 mg pour cent est nettement supérieure à la valeur de 80 mg pour cent habituellement utilisée comme critère d'atteinte de $\dot{V}O_2$ max (ÅSTRAND P.O., 1952, ÅSTRAND I., 1960, RODAHL et ISSEKUTZ, 1962).

- Mesure de la fréquence cardiaque : la valeur moyenne de F.C. max : 188 pulsations pour des sujets de 22,7 ans et très nettement inférieure à la valeur moyenne définie pour les sujets de cet âge: 200 ± 10 puls/min (ÅSTRAND et CHRISTENSEN, 1964).

Cette valeur est encore inférieure à celle proposée par CTM DAVIES (1968) qui a montré que la valeur de FC max est d'autant plus basse que $\dot{V}O_2$ max est plus élevé, et a observé une valeur moyenne de 192 puls/min pour un $\dot{V}O_2$ max de 4 l/min, dans une population de sujets âgés de 20 à 25 ans. La mesure de fréquence à l'avant-dernier palier (181 puls/min pour $\dot{V}O_2 = 3,59$ l/min) montre cependant que à partir de ce niveau la courbe traduisant la relation $FC/\dot{V}O_2$ a tendance à s'infléchir, ce qui indique une tendance au plafonnement.

L'examen de tous ces critères, s'il ne permet pas d'affirmer que $\dot{V}O_2$ max a été réellement atteint, permet de supposer que la valeur mesurée est très proche de la valeur théorique. Cette discordance entre les différents facteurs pose d'ailleurs une fois de plus le problème de la validité de la mesure de $\dot{V}O_2$ max sur bicyclette ergométrique chez des sujets habitués à un type d'exercice très différent.

2) Mesure de la dette maximale d'oxygène

a) Choix de la puissance d'exercice

- Le but de l'épreuve est de faire pratiquer un exercice mettant en jeu de façon prépondérante le métabolisme anaérobie lactique et menant à épuisement entre 2 et 3 minutes.

- D'après l'expérience d'ÅSTRAND et SALTIN (1961), il apparaît que des exercices représentant des puissances comprises entre 135 et 115 % de la puissance maximale aérobie amènent à épuisement en 2 à 3 minutes, tout en permettant d'atteindre $\dot{V}O_2$ max en fin d'exercice.

Nous avons donc fait pratiquer des exercices à 125 % de la puissance maximale aérobie pour chacun des 7 sujets.

Le temps moyen d'exercice est 2 mn 6 secondes

b) Pourcentage de $\dot{V}O_2$ max atteint en fin d'exercice

Seuls 3 sujets ont atteint 100 % de $\dot{V}O_2$ max en fin d'exercice (moyenne 95,6 %). Le recueil des gaz expirés a été réalisé pendant les 30 dernières secondes de l'exercice. Il est probable qu'un recueil plus court aurait permis d'atteindre un pourcentage de $\dot{V}O_2$ max voisin de 100 % pour tous les sujets.

c) Détermination de $\dot{V}O_2$ de repos

Il nous est apparu que la mesure directe de $\dot{V}O_2$ de repos était liée à trop d'incertitudes. L'appréhension des sujets à l'approche d'un exercice épuisant, l'hyperventilation habituelle lors de l'utilisation du masque donnent des résultats significativement majorés. Nous avons donc utilisé les tables de BOOTHBY (1936) et déterminé $\dot{V}O_2$ de repos de façon indirecte à partir de la surface corporelle, du poids et de l'âge des sujets.

d) Durée de la période de récupération

Le temps de recueil des gaz expirés pendant la récupération a été ramené à une valeur minimale de 37 minutes.

Ce délai de récupération n'a jamais permis de retrouver l'état basal de $\dot{V}O_2$. A la 37ème mn $\dot{V}O_2$ était en moyenne supérieur de 42,2 % à $\dot{V}O_2$ de repos (20 - 58,4 %). Cette observation justifie une fois de plus la durée théorique de récupération fixée à 60 minutes, durée qui n'a pu être respectée lors de nos mesures du fait des conditions et de l'horaire utilisées pour les épreuves.

e) Aucune relation significative ne peut être déduite de la comparaison des différents facteurs liés à l'exercice supramaximal pour notre étude. Il apparaît cependant que la concentration sanguine maximale de lactate mesurée à un temps donné de la récupération (10ème mn) est d'autant plus élevée que la dette effective est importante.

3) Dosage du lactate sanguin

a) Mode de prélèvement

Nous avons constamment utilisé un prélèvement veineux à l'avant-bras. Compte-tenu de l'importante vasodilatation survenant pendant l'exercice, il paraît concevable que la différence de concentration du lactate soit minime entre le sang artérialisé et le sang veineux prélevé dans ces conditions.

b) Détermination de l'erreur incombant au dosage.

Les dosages sur tube doublé ont permis de déterminer l'intervalle d'incertitude pour chaque mesure.

La valeur moyenne de cette incertitude relative est de $\pm 4\%$ (3 % - 7 %).

L'établissement d'une courbe d'étalonnage lors de chaque manipulation et l'utilisation de la portion linéaire de cette courbe ont vraisemblablement minimisé l'influence des conditions expérimentales de chaque manipulation (température en particulier).

4) Mesure de la puissance musculaire instantanée

a) Emploi des contacts mécaniques

Le procédé de chronométrage utilisé par MARGARIA est composé d'un faisceau lumineux interrompu par le passage du sujet. Pour que l'interruption du faisceau soit réalisé dans les mêmes conditions, pour chaque mesure, il est nécessaire qu'il soit placé le plus près possible du seuil de la marche. Dans ces conditions, l'utilisation d'un contact mécanique sensible placé sur la marche, représente les mêmes critères de fiabilité pour une mise au point technique plus simple. C'est ce qui a motivé notre choix pour le système de contact mécanique.

b) Intérêt de la précision au 1/1000ème de seconde

La différence moyenne entre les 2 meilleurs temps réalisés par nos sujets (n = 42) est de 0,015 secondes (0 - 0,05).

Il semble donc que la précision au 1/100ème de seconde soit suffisante.

5) Détermination du type d'exercice pendant le jeu

a) L'appréciation du type de course est liée à la subjectivité de l'observateur qui doit analyser instantanément des périodes d'exercices se succédant à un rythme très rapide.

b) Evaluation de l'erreur de la mesure

Le temps de référence est représenté par la durée totale de l'enregistrement magnétique.

La somme de tous les intervalles obtenus après transcription, représente le temps théorique.

La différence entre ces deux facteurs représente pour notre étude une incertitude moyenne relative de $\pm 7\%$.

6) Enregistrement de la fréquence cardiaque par télé-métrie

L'analyse finie des complexes QRS du tracé électrocardiographique a été possible dans tous les cas, et lors de tous les types d'exercice pratiqués. En cas d'exercice intense, les tracés parasites recueillis n'interfèrent que très rarement avec la lecture des QRS.

Ce type d'enregistrement permet donc une mesure précise de la fréquence cardiaque même dans les cas les plus défavorables.

ANALYSE DES RESULTATS

I - VALEUR COMPARATIVE DES RESULTATS

1) $\dot{V}O_2$ Max

- La valeur moyenne représentative de notre échantillon de joueurs (53,3 ml/mm/Kg) est significativement supérieure à la valeur habituellement mesurée chez les sujets sédentaires (45 ml/kg/mm : ÅSTRAND P.O. 1952, FLANDROIS et coll. 1966) et significativement inférieure à celle des sujets pratiquant à un haut niveau des disciplines de type aérobie (84 ml/mm/kg pour le ski de fond ; BERGH 1974).

- Nous n'avons trouvé aucune référence concernant le hand-ball dans la littérature. La comparaison des résultats est possible avec ceux obtenus chez des joueurs de basket-ball qui pratiquent une discipline sportive se rapprochant du hand-ball sur de nombreux points : durée de jeu équivalente, dimensions du terrain comparables, périodes de jeu et de repos apparemment déterminées par des intervalles très courts.

Une des meilleurs équipes françaises pratiquant le basket-ball au niveau européen présente un niveau moyen de $\dot{V}O_2$ max mesuré à 53 ml/mm/Kg (résultats communiqués par Pr. FLANDROIS).

COLEMAN et coll (1974) rapportent des résultats comparables à propos d'une équipe universitaire des USA : valeurs extrêmes comprises entre 42,5 et 56,4 ml/mm/kg.

PARNAT et coll (1975) ont mesuré une valeur moyenne de 55,3 ml/mm/kg pour une équipe russe d'élite.

2) Dettes maximale d'oxygène

Cette mesure n'a pas été réalisée de façon courante chez des joueurs pratiquant une discipline collective.

Nous rapportons les résultats obtenus par KARLSSON et coll (1967) à propos d'athlètes spécialisés sur des courses de différentes longueurs.

400 m	:	Dette effective	11 litres d'oxygène 145 ml/kg
1500 m	:	Dette effective	10 litres 145 ml/kg
3000 m	:	Dette effective	5,5 à 8,5 litres 95 à 110 ml/kg
5000 m	:	Dette effective	5 litres 85 ml/kg

Compte-tenu de la valeur moyenne mesurée chez nos joueurs (6,23 l et 85,8 ml/kg) il apparaît que celle-ci est très inférieure à celle mesurée chez les athlètes spécialisés dans les courses courtes (400 m) nécessitant une aptitude anaérobie lactique très développée.

Nos joueurs se situent au niveau des coureurs de 1500 - 3000 m, mais les différences fondamentales entre les deux sports ne permettent d'en tirer aucune conclusion.

3) Puissance maximale instantanée

Nos résultats sont comparables et semblables à ceux obtenus par MARGARIA (1966) chez des sportifs entraînés (fig. 15).

La valeur de 2,8 m/s mesurée par MARGARIA représente la performance d'un coureur de 200 m de niveau olympique.

COLEMAN (1974) rapporte les valeurs mesurées chez les joueurs de basket-ball.

Pour un échantillon de joueurs dont les caractéristiques morphologiques sont les suivantes : taille 192 cm, poids 86,5 Kg, la valeur moyenne de la vitesse verticale maximale est de 1,62 m/s, la puissance maximale instantanée étant mesurée à 80,1 kcal/mn.

Pour nos joueurs : taille 180 cm, poids 75 kg, on obtient respectivement 1,71 m/s et 75,2 Kcal/mn.

Il apparaît d'après ces résultats que les caractéristiques morphologiques interviennent pour la détermination de la puissance maximale instantanée.

Ainsi performance et mesure énergétique globale sont en contradiction.

Il semble que pour des disciplines basées essentiellement sur la vitesse d'exécution et à un degré moindre sur la force musculaire, les résultats exprimés en m/s soit plus représentatifs que l'évaluation de la dépense énergétique globale.

Nos joueurs présentent donc une bonne aptitude à l'exercice nécessitant une grande vitesse d'exécution puisque les valeurs obtenues sont supérieures à celles mesurées chez des joueurs de basket-ball de haut niveau.

Pour des disciplines faisant intervenir la puissance musculaire tout en nécessitant une bonne vitesse d'exécution (lancer), il semble que l'évaluation de la dépense énergétique caractérise mieux l'athlète que la mesure de la vitesse verticale.

II - CONCLUSIONS PRATIQUES

1) Caractéristiques énergétiques requises par le hand-ball

- L'étude du niveau énergétique des rencontres permet de conclure que la pratique du hand-ball nécessite une bonne capacité aérobie. Le pourcentage moyen de $\dot{V}O_2$ max utilisé pendant les rencontres s'élève en moyenne à 80 %. Il semble donc qu'une valeur moyenne élevée de $\dot{V}O_2$ max pour l'ensemble des joueurs soit nécessaire pour que l'équipe puisse imposer une grande intensité au jeu tout au long de la rencontre.

- Puisque les phases de jeu sont caractérisées par des intervalles exercices - repos en majorité inférieurs à 10 secondes, il apparaît qu'une équipe de hand-ball doit être composée de joueurs possédant une bonne aptitude anaérobie alactique évaluée par la mesure de la vitesse d'exécution (test de MARGARIA).

- Les résultats de la concentration sanguine de lactate après les rencontres tendent à prouver que le métabolisme anaérobie lactique est peu sollicité par la pratique du hand-ball. Il faut cependant souligner que l'équipe qui a donné lieu à cette expérimentation évoluait cette saison à un niveau relatif bas (21 victoires, 1 défaite).

Il est vraisemblable qu'une rencontre disputée entre deux équipes de haut niveau nécessite une bonne capacité anaérobie lactique. En effet, certaines phases de jeu représentent des temps d'exercices intenses assez longs (séries de contre-attaques, défense individuelle), avec temps de repos court ou nul. Ces phases de jeu ne peuvent être exécutées de façon correcte par les joueurs que si ceux-ci présentent une bonne aptitude et une préparation adaptée aux exercices provoquant un important déficit en oxygène et une concentration sanguine de lactate élevée.

2) Conclusions pratiques concernant les entraînements

- Il apparaît d'après nos mesures que la dépense énergétique aérobie des entraînements est moindre que celle des rencontres (valeur moyenne : 73 % $\dot{V}O_2$ max). Ceci est du en partie à la difficulté d'imposer des intervalles exercices-repos stricts. Le grand nombre de joueurs présents à l'entraînement influe sur la dynamique collective et tend à opposer une réaction d'inertie aux directives de l'entraîneur.

- Le travail de la vitesse de réaction est facilité par l'utilisation de répétitions de sprints chronométrés. La motivation est trouvée en partie pendant ces exercices dans l'esprit de compétition.

- La fin des séances d'entraînement est utilisée à la réalisation d'exercices très pénibles amenant à épuisement et effectués en groupe. La surveillance de la fréquence cardiaque (poul carotidien) pendant les périodes de récupération permet au joueur de "vivre" son exercice supra-maximal et de le pratiquer dans les meilleures conditions. Ceci explique les valeurs élevées de concentration sanguine de lactate dosées après ces entraînements (104 mg %).

Il apparaît qu'un tel entraînement des processus anaérobies lactiques ne semble pas justifié aux vues du bilan énergétique des rencontres pratiquées cette saison.

Cependant, une bonne aptitude à l'exercice anaérobie lactique sera vraisemblablement utile au niveau national. Ce type d'entraînement doit donc être conservé.

3) Le hand-ball et la physiologie

La réalisation pratique de cette étude bioénergétique a été facilitée par le sérieux et la disponibilité de l'ensemble de l'effectif. Les diverses épreuves pratiquées n'ont jamais été considérées par les joueurs comme des moyens discriminatifs de sélection, mais comme un outil de surveillance et une tentative "d'approche scientifique" de leur sport.

Il apparaît en effet évident que l'analyse bioénergétique d'un joueur de hand-ball ne doit pas être utilisée comme seul critère de sélection. Cependant les mesures physiologiques objectives peuvent être utilisées lors de l'incorporation de nouveaux joueurs au sein de l'équipe. Les résultats obtenus sont susceptibles de mettre en valeur des capacités énergétiques qu'il sera nécessaire de développer en accord avec l'entraîneur.

Pour le présent travail, nous avons demandé à l'entraîneur de déterminer selon son seul avis les qualités individuelles de ses joueurs : punch et vitesse de réaction, résistance et endurance en parallèle à nos résultats concernant la puissance maximale instantanée, la dette maximale d'oxygène et la consommation maximale d'oxygène. Dans 65 % des cas, le jugement de l'entraîneur est en accord avec les données physiologiques. Dans 35 % des cas, l'analyse comparative révèle des oppositions relatives ou absolues. La majorité des désaccords sont représentés par l'évaluation de la capacité anaérobie lactique.

4) Analyse prospective

Il est actuellement officiel que l'équipe du C.A. St-Etienne pratiquera la saison prochaine au niveau national.

L'aptitude générale déterminée chez les joueurs et l'analyse comparative permettent de conclure que cette équipe présente les caractéristiques physiologiques énergétiques d'une équipe de haut niveau.

- La confrontation à des rivaux de niveau supérieur va sans aucun doute requérir une dépense énergétique globale majorée.

- Il semble donc que les joueurs bénéficieront d'une adaptation des entraînements aux processus aérobie, les conditions actuelles d'entraînement anaérobie, alactique ou lactique semblant bien adaptées à l'exercice de leur sport.

CONCLUSIONS

Une rencontre de Hand-Ball se déroule pendant deux mi-temps de 30 minutes séparées par 10 minutes de repos et représente une dépense énergétique s'élevant à environ 1000 Kcal.

La durée des intervalles d'exercice atteint 2 à 4 secondes (50 à 60% des cas) et ne dépasse qu'exceptionnellement 12 secondes. La durée des intervalles de repos atteint 2 à 8 secondes (60 - 70 % des cas) avec durée maximale de 20 secondes, dans les conditions de jeu.

Ceci se traduit par une fréquence cardiaque moyenne qui équivaut à 80 % de $\dot{V}O_2$ max. La fréquence cardiaque atteint exceptionnellement son niveau maximal (3 % de la durée totale). Le niveau minimal (60 % $\dot{V}O_2$ max) est maintenu pendant 10 - 15 % de la durée totale.

A la fin des rencontres, la concentration sanguine de lactate est de 40 - 45 mg %, ce qui correspond à la valeur généralement retrouvée pour des sujets entraînés pratiquant un exercice à 80 % de $\dot{V}O_2$ max.

La valeur moyenne de $\dot{V}O_2$ max (53 ml/min/kg) est sensiblement égale à celle mesurée dans d'autres équipes amateurs de sport collectif, (basket-ball) de niveau national. La dette maximale d'oxygène et la puissance maximale instantanée sont elles aussi nettement supérieures à celles mesurées chez des sujets sédentaires.

Considérées individuellement, ces valeurs sont cependant toutes inférieures à celles atteintes par les athlètes pratiquant des disciplines faisant particulièrement appel à chacun de ces processus de libération d'énergie. Il apparaît donc que le Hand-Ball ne développe pas un processus énergétique isolé de façon spécifique. L'aptitude anaérobie des joueurs étudiés semble cependant relativement plus élevée que l'aptitude aérobie.

Ces différents résultats doivent être considérés :

- en fonction du niveau de pratique de l'équipe : une meilleure aptitude aérobie n'est-elle pas nécessaire aux conditions de compétition au niveau national.

- en fonction du niveau énergétique des entraînements qui peut être par lui seul responsable de la valeur moyenne relativement élevée des processus anaérobies, et en particulier de la dette d'oxygène.

Le Directeur de l'UER
de Médecine

Professeur C. CABAL

Le Président de la Thèse

Professeur R. FLANDROIS

Vu et Permis d'imprimer

LYON, le 2 MAI 1977

Le Président de l'Université Claude BERNARD

Professeur D. GERMAIN

BIBLIOGRAPHIE

- AGNEVIK G., Fotball - Idrottsfysiologi, rapport N° 7
Trygg. Hansa ed. Stockholm 1970
En Français : Etude Physiologique du Football. Traduit du suédois
par M. ROBIN, J.R. LACOUR ed. Diffusé par la Fédération Française
de Football Saint-Etienne 1976.
- ÅSTRAND I. Aerobic work capacity in men and women with special reference to age
Acta physiol. Scand. (1960), 49, suppl 169.
- ÅSTRAND I., ÅSTRAND P.O., CHRISTENSEN E.H., HEDMAN R.,
Intermittent muscular work - Acta Physiol. Scand (1960), 48, 448-454.
- ÅSTRAND I., ÅSTRAND P.O., HALLBÄCK I., KILBOM A.,
Reduction in maximal oxygen uptake with age - J. Appl. Physiol. (1973)
35, 649-654.
- ÅSTRAND P.O. Experimental studies of physical working capacity in relation to
sexe and age - Copenhagen, 1952, Munksgaard ed.
- ÅSTRAND P.O., CHRISTENSEN E.H.,
Aerobic work capacity in F. Dickens, E. Neil and W.F. Widdas Eds,
p. 295, "Oxygen in the Animal Organism". - Pergamon Press, New York
1964
- ÅSTRAND P.O., CUDDY T.E., SALTIN B., STENBERG J.,
Cardiac output during submaximal and maximal work. - J. Appl. Physiol.
(1964), 19, 268-274
- ÅSTRAND P.O., RODAHL K., "Textbook of Work Physiology". Mc Graw Hill ed. New York
1966, traduit en Français par J.R. LACOUR, "Manuel de Physiologie de
l'Exercice Musculaire". Masson ed. Paris 1973.
- ÅSTRAND P.O., RYHMING I., A normogram for calculation of aerobic capacity (physi-
cal fitness) from pulse rate during submaximal work.
J. Appl. Physiol., (1954), 7, 218-221

- ÅSTRAND P.O., SALTIN B., Oxygen uptake during the first minutes of heavy muscular exercise - J. Appl. Physiol. (1961), 16, 971-976
- ÅSTRAND P.O., SALTIN B., Maximal oxygen uptake and heart rate in various types of muscular activity. - J. Appl. Physiol (1961), 16, 977-981
- BALKE B., Work capacity after blood donation. - J. Appl. Physiol. (1954), 7, 231-238
- BERGH U., Längldöpfung : Idrottsfysiologi. rapport N° 11 - Trygg Hansa Ed. Stockholm 1974.
En français : Etude physiologique du ski de fond. traduit du suédois par M. ROBIN, J.R. LACOUR ed. diffusé par la Commission Médicale de la Fédération Française de Ski - Saint-Etienne 1976
- BERMEYER H.U., "Methods of Enzymatic Analysis" - Verlag Chemic Academic Press (1965)
- BOOTHBY W.M., BERKSON J., DUNN H.L., Studies of energy of metabolism of normal individuals : standard for basal metabolism, with normogram for clinical application. - Am. J. Physiol. (1936), 116, 468-484
- CHARBONNIER J.P., Consommation maximale d'oxygène et aptitude physique du nageur de compétition. - Thèse Med. Lyon 1974
- CHARBONNIER J.P., LACOUR J.R., RIFFAT J., FLANDROIS R.,
Experimental study of the performance of competition swimmers.
Europ. J. Appl. Physiol. occup. Physiol. (1975), 34, 157-167
- CHRISTENSEN E.H., Beiträge zur Physiologie schwerer Körperlicher Arbeit VI. Der stoffwechsel und die respiratorischen Funktionen bei schwerer Körperlicher Arbeit.
Arbeit Physiol (1932), 5, 463-478
- CHRISTENSEN E.H., HEDMAN R., SALTIN B., Intermittent and continuous running.
Acta Physiol. Scand. (1960), 50, 269-286

- COLEMAN A.E., KREUZER P., FRIEDRICH D.W., JUVENAL J.P.,
Aerobic and anaerobic responses of male college. Freshmen during a
season of basket ball. - J. Sports. Med. Phys. Fitn. (1974), 14,
26-31
- COSTILL D.L., SPARKS K., GREGOR R., TURNER C.,
Muscle glycogen utilisation during exhaustive running
J. Appl. Physiol. (1971), 31, 353-356
- DAVIES CTM., Limitation to the prediction of maximum oxygen intake from cardiac
frequency measurements.
J. Appl. Physiol. (1968), 24, 700-706
- D. PRAMPERO P.E., PEETERS L., MARGARIA R.
Alactic O₂ debt and lactic acid production after exhausting exercise
in man.
J. Appl. Physiol. (1973), 34, 628-632
- DURAND-BAILLOUD J., La consommation maximale d'oxygène chez le rameur français
de compétition. - Thèse Médecine Lyon 1975
- EKBLOM B., Effect of physical training on oxygen transport in man.
Acta Physiol. Scand. (1969), 58, suppl. 328
- EKBLOM B., HERMANSEN L., SALTIN B., Idrottsfysiologi rapport n° 5 Hastighetsaking
pa Skridsko - Trygg Hansa Ed. Stockholm 1967
- EKLUND B., HULTEN B., LUNDIN A., NORD L., SALTIN B., SILANDER L.,
Orientering. Idrottsfysiologi rapport n° 10 - Trygg Hansa Ed.
Stockholm 1973
En français : La course d'orientation en compétition. Traduit du sué-
dois par M. ROBIN, J.R. LACOUR ed. Diffusé par la Fédération Françai-
se de course d'orientation, Epernay 1976
- FLANDROIS R., Influence de l'altitude sur la prédiction de la capacité aérobie
à partir de la fréquence cardiaque.
Thèse de spécialité militaire Lyon 1969

FLANDROIS R., SEPETJIAN J., LACOUR J.R.,

La détermination de l'aptitude physique : les indices morphologiques
et les épreuves fonctionnelles circulatoires et respiratoires.

Rev. Corps. Santé (1966), 7, 961-981

GRESSIER M., Aptitude à l'exercice intense de longue durée. Etude de quelques
skieurs de fond de niveau international.

Thèse Médecine Lyon 1975

HAGERMAN F.C., Mc KIRMAN M.D., POMPEI J.A.,

Maximal Oxygen consumption of conditioned and unconditioned oarsmen
J. Sports Med. Phys. Fitn. (1975), 15, 43-48

HANSON J.S., Maximal exercise performance in members of the U.S. Nordic Ski
Team - J. Appl. Physiol. (1973), 35, 592-595

HERMANSEN L., Lactate production during exercise : In "Muscle Metabolism during
Exercise". - Plenum Press, New York (1971) 401-407

HERMANSEN L., SALTIN B., - Blood lactate concentration during exercise at acute
exposure to altitude. In "Exercise in Altitude". - Experta Medica
Foundation, Amsterdam, 1967, 48-53

HERMANSEN L., SALTIN B., Oxygen uptake during maximal treadmill and bicycle
exercise.
J. Appl. Physiol. (1969), 26, 31-37

HERMANSEN L., STENSVOLD I., Production and removal of lactate during exercise
in man. - Acta. Physiol. Scand. (1972), 86, 191-201

HOLMGREN A., ASTRAND P.O., - DLCO and the dimensions and Functionnal capacity
of the O₂ transport system in humans.
J. Appl. Physiol. (1966), 21, 1463-1470

HOWALD H., Auswirkungen sportlicher Aktivität auf den Stoffwech-sef.
Schweiz - Med. Wschr. (1974), 104, 1535-1538

- HULTMANN E., Studies on muscle metabolism of glycogen and active phosphate in man with special reference to exercise and diet.
Scand. J. Clin. Lab. Invest. (1967), 19, suppl. 94
- KARLSSON J., Lactate and phosphagen concentrations in working muscle of man (with special reference to oxygen deficit at the onset of work)
Acta Physiol. Scand. (1971) Suppl. 358
- KARLSSON J., Lactate in working muscles after prolonged exercise.
Acta. Physiol. Scand (1971), 82, 123-130
- KARLSSON J. HERMANSEN L., AGNEVIK G., SALTIN B.,
Etude physiologique des besoins en énergie lors de la course à pied applications à l'entraînement. - Idrottsfysiologi, rapport n° 5 (1967)
Traduit du suédois par M. ROBIN, UER EPS de Lyon Ed.
- KNUTTGEN H.G., Oxygen debt after supra maximal physical exercise.
J. Appl. Physiol. (1970), 29, 651-657
- KREBS H., Oxygen in the Animal Organism. Dickens F., Neil E., Widdas W.F. Ed.
Pergamon press. New-York, 1964, p. 304
- LACOUR JR., Etude physiologique de la course à pied. Dans "Traité d'Athlétisme. Les courses" Vigot Frères Ed., 1976, 11-68
- LUNDIN A., Bord tennis. Idrottsfysiologi, rapport N° 12. - Trygg Hansa Ed.
Stockholm 1974.
En français : Etude physiologique du tennis de table. J.R. LACOUR ed. Diffusé par la Fédération Française de Tennis de Table , Paris 1977.
- MARGARIA R., AGHEMO P., ROVELLI E.,
Measurement of muscular anaerobic power in man.
J. Appl. Physiol. (1966), 21, 1662-1664

- MARGARIA R., CERETELLI R., DIPRAMPERO P.E., MASSARI C., TORELLI G.,
Kinetics and mechanism of oxygen debt contraction in man.
J. Appl. Physiol. (1963), 18, 371-377
- MARGARIA R. CERETELLI R., MANGILI F.,
Balance and kinetics of anaerobic energy release during strenuous
exercise in man.
J. Appl. Physiol. (1964), 19, 623-628
- MITCHELL J.H., SPROULE B.J., CHAPMAN C.B.,
The physiological meaning of the maximal oxygen intake test.
J. Clin. Invest (1958), 37, 538-547
- PARNAT J., VIRU A., SAVI T., NURMEKIVI A.,
Indices of aerobic work capacity and cardiovascular response during
exercise in athletes specializing in different events.
J. Sports med. Phys. Fitn. (1975), 15, 100-105
- RODAHL K., ISSEKUTZ B., Physical performance capacity in the older individual
in "Muscle as a Tissue", Chap 15, Mc Graw-Hill Book Company. New York
1962
- ROWELL L.B., The liver as an energy source in man during exercise. In "Muscle
Metabolism during Exercise". Plenum. Press. New York (1971) 127-141
- ROWELL L.B., KRANING K.K., EVANS T.O., WARDKINNEY J., BLACKMON J.R., KUSUMI F.,
Splanchnic removal of lactate and pyruvate during prolonged exercise
in man. - J. Appl. Physiol. (1966), 21, 1773-1783
- SAIKI H , MARGARIA R., CUTTICA F.,
Lactic acid production in submaximal work. Int. Z. angew. Physiol.
(1967), 24, 57-61
- SALTIN B., P.O. ÅSTRAND, Maximal oxygen uptake in athletes.
J. Appl. Physiol. (1967), 23, 353-358

WILLIAMS C.G., WYNDHAM C.H., KOK P., VON RAHDEN M.J.E.,

Effect of training on maximum oxygen intake and on anaerobic metabolism in man.

Int. Z. angew. Physiol. einschl. Arbeits Physiol. (1967), 24, 18.

WILLIAMS C.G., DU RAAN A.J.N, VON RAHDEN M.J.E., WYNDHAM C.H.,

The capacity for endurance work in highly trained men

Int. Z. angew. Physiol. (1968), 26, 141-149

WYNDHAM C.H., SEFTEL H.C., WILLIAMS C.G., WILSON V., STRYDOM N.B., BREDELL G.A.G.
VON RAHDEN M.J.E.

Circulatory mechanism of anaerobic metabolism in working muscle

S. Afr. Med. J. (1965), 39, 1008-1014

WYNDHAM C.H., WILLIAMS C.G., VON RADHEN M.,

A physiological Basis of the "Optium"Level of energy capacities.

Nature (1962), 195, 1210.

